

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.025

线路工程地震触发高位崩塌滑坡灾势预测方法

郭海强¹, 姚令侃^{1,2,3}, 孙少伟¹

(1.西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2. 高速铁路线路工程教育部重点实验室(西南交通大学), 成都 610031;
3. 抗震工程技术四川省重点实验室(西南交通大学), 成都 610031)

摘要: 为了能够在高烈度山区快速判识威胁到线路工程的地震触发高位崩塌滑坡, 提出一种地震触发高位崩塌滑坡灾势预测方法。预测方法在 GIS 技术支持下, 按照水文地质条件划分边坡单元; 基于边坡单元建立威胁线路的高位边坡判识模型, 即高位边坡须同时满足能量和路径两种必要条件, 才能保证其在失稳后会威胁到线路工程; 在此基础上, 结合综合指标法预测地震触发的崩塌滑坡, 得到了研究区域内地震作用下威胁到线路工程的高位崩塌滑坡灾势区划图。案例分析结果表明: 灾势预测方法可以对来自于路域以外复杂坡体条件下的地震触发高位崩塌滑坡体是否会威胁到线路工程进行快速判识, 对高烈度山区线路选线以及既有线改建工程提供决策依据, 可用于指导选线设计人员快速完成空间概略定线及多目标决策。

关键词: 地震; 高位滑坡; 危险度区划; 选线设计; GIS

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)03-0155-07

Potential disaster prediction of seismic high-locality landslide on line project

GUO Haiqiang¹, YAO Lingkan^{1,2,3}, SUN Shaowei¹

(1.School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2.Key Laboratory of High-speed Railway Engineering(Southwest Jiaotong University), Ministry of Education, Chengdu 610031, China;

3.Sichuan Key Laboratory of Seismic Engineering and Technology(Southwest Jiaotong University), Chengdu 610031, China)

Abstract: To quickly identify whether seismic high-locality landslides could threaten the line project at high-intensity mountains, potential disaster prediction of seismic high-locality landslide is proposed. According to hydrogeology condition, slope units are divided by GIS technology. Discriminant model of seismic high-locality slopes threatening line project is established. The model contains energy and path conditions. Both of two conditions are met, it can be ensured that seismic high-locality slope threatening the line project after losing stabilities. Zoning map of the seismic high-locality slopes threatening line project in study area can be obtained. Case analysis results indicate that this model approach can identify quickly which seismic high-locality landslides could threaten the line project under complex slope conditions, and provide a decision basis for location design and reconstruction of existing lines project at high-intensity mountains, and can also be used to guide designers to complete sketchy space alignment and multi-objective decision quickly in mountain.

Keywords: earthquake; high-locality landslide; hazard zonation; location design; GIS

21 世纪以来, 中国进入地震高发期, 在短短 5 a 间四川境内就相继发生了两场大地震 (M_s 8.0 汶川大地震、 M_s 7.0 芦山地震)^[1-3]。在这两场地震中, 均触发了大量的崩塌、滑坡灾害, 对灾区道路造成了严重损毁。据统计, 汶川地震所引发的崩塌滑坡灾害造成公路受损近 2.8×10^4 km (21 条高速公路、15 条国省干线公路、2 795 条农村公路), 同时也造成铁路受损 (成灌铁路、广岳铁路、德天铁路、宝成铁路绵阳至广元段等)。山区公路、铁路作为生命线工

程, 在震后的抗震救灾中起着巨大的作用, 而在震后的实地调研中发现, 对线路损害最严重的是崩塌滑坡等次生山地灾害, 少到数十方的崩塌落石、大到数百万方的滑坡体掩埋线路并阻断交通。在线路工程抢通过程中, 极大地阻碍了救援队伍和工程机械进入灾区, 增大了救援难度^[4]。

5.12 汶川地震触发的次生灾害结果表明, 大量的高位崩塌滑坡是造成线路工程震害的主要威胁, 如崔鹏等对 M_s 8.0 汶川地震后所触发的崩塌滑坡到岭脊与到河网的距离进行了归一化处理, 并得到了地震触发的崩塌滑坡与河流、山脊位置分布关系。位于坡面距山脊归一化距离小于 0.4 的崩塌滑坡占总崩塌滑坡的 65%, 这是汶川地震作用下斜坡破坏的一个突出的特点, 即崩塌滑坡发生部位一般都是位于山脊附近或山坡的坡肩, 这与山脊处和坡肩处

收稿日期: 2015-05-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41172321);

国家自然科学基金重点项目(41030742);

中国铁路总公司科技研究开发计划(20014G004-A-6)

作者简介: 郭海强(1987—), 男, 博士研究生;

姚令侃(1953—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 姚令侃, yaolk@swjtu.edu.cn

应力集中释放及对地震波的放大作用直接相关^[5].

汶川地震前,有关高位崩塌滑坡问题并未引起人们足够的重视,而在汶川地震后,就个体高位崩塌滑坡的形成机理、影响范围等研究已成为热点课题^[6];对于铁路、公路而言,最关心的是高位崩滑坡体能否冲到路域内对线路工程造成危害. 目前有关线路两侧边坡崩塌滑坡的判识已较成熟,但对来自于路域以外复杂坡体条件下的高位崩塌滑坡体能够威胁到线路工程的判识,还涉及到崩滑坡体的运动轨迹、运动距离的确定等问题,尚属甚少有人涉足的领域.

针对以上不足,本文提出了一种地震触发高位崩塌滑坡灾势预测方法,该方法在 ArcGIS(地理信息系统软件)技术支持下,按照地质条件及水文地质条件划分边坡单元,并建立区分威胁线路的高位边坡模型. 该模型可以用于指导高烈度区线路选线以及既有线改建工程.

1 地震触发高位崩塌滑坡灾势预测的原理方法

地震触发高位崩塌滑坡灾势预测方法的原理是基于卫星遥感数据,应用 GIS 的空间分析技术与地震触发崩塌滑坡统计方法相结合,对新建线路或既有线改建地区划分边坡单元,然后建立高位边坡单元判识模型,该模型根据边坡能否同时满足能量条件及路径条件来判断威胁线路安全的高位边坡. 最后基于综合指标法快速生成区域地震触发高位崩塌滑坡灾害的灾势区划图,其判别程式如图 1 所示.

1.1 区域边坡单元化

目前划分边坡单元的方式主要分为规则网格单元和复杂边坡单元两种. 规则网格单元的计算和算法相对简单,但与实际的边坡破坏单元及力学机制无任何联系,与地质、地形及水文也毫不相干. 边坡单元定义为一块与邻近区域具有明显不同的地形特征的区域,而地形的形成本身反映了地质条件及水文地质条件的长期作用效果^[7-9]. 如图 2 边坡划分示意图所示,通过 ArcGIS 的水文分析功能找出数字地形图中的山脊线与山谷线,并通过山谷线与山脊线将集水流域划分出边坡 A 与边坡 B. 边坡单元的大小选定取决于研究区域内历史滑坡的平均尺寸(如果缺少历史滑坡的记录可参考临近地区历史滑坡资料来确定边坡单元的大小平均尺寸),即对于同一区域内具有相同或类似的地形、地质及水文条件的研究对象,可以认为其将来可能产生的滑坡破坏与过去的滑坡破坏在规模上是一致的. 在实际应用时,需要进行多个阈值的对比、试算确定合适的阈

值水平^[9].

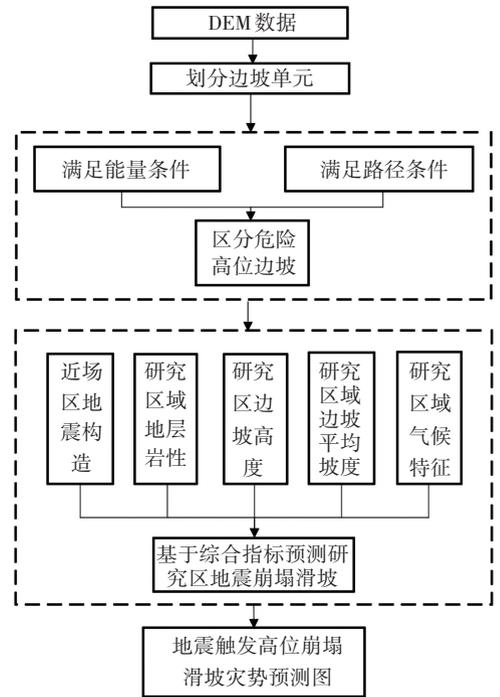


图 1 地震触发高位崩塌滑坡灾势区划判别程式

Fig.1 Block diagram of assessment of seismic high-locality landslide hazard zones

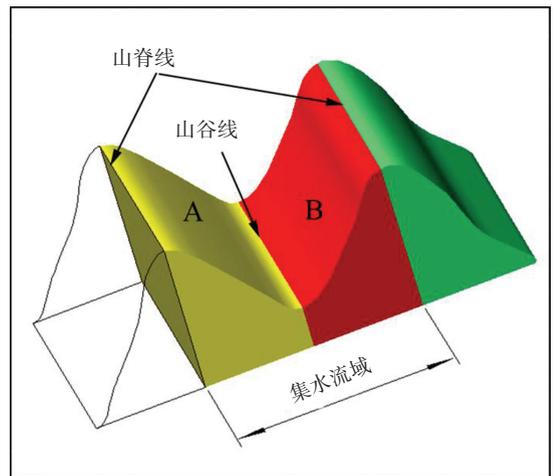


图 2 边坡划分示意

Fig.2 Schematic diagram of slope

水文特征与区域地表高程的起伏状况有关,降落在山体表面上的雨水,除去下渗部分,其余在地表径流的水体则遵循一定的规律在重力作用下从坡顶高处向坡底低洼处流动并汇集. 使用 ArcGIS 软件的水文分析工具能够根据水流流动规律,完成对区域内的水文分析. 利用水文分析模块分别对 DEM(数字高程模型)进行无洼地 DEM 提取、水流方向提取、水流汇集、河网生成、集水流域分析,得到山脊线. 而山谷线的提取则是通过将原来的山谷变为山脊,然后采用相同的方法对反向 DEM 进行无洼地

DEM提取、水流方向提取、水流汇集、河网生成和积水流域分析等操作就可以得到山谷线. 经栅格数据转换成面域,在此运算中会产生一些不正确的多边形边坡单元和面积很小或不协调的多边形边坡单元,通过使用GIS的融合(dissolve)和统合(integrate)功能消除不合理的多边形边坡单元.

1.2 地震触发高位崩塌滑坡模型判别方法

高位崩塌滑坡具有滑动距离远、破坏强度大等特点,一直都是众多学者研究的热点. 目前,国际上通常采用滑坡体质心的最大高度 H^* 与质心的最大水平距离 L^* (或滑坡顶部的最大高度 H_{max} 和最大水平距离 L_{max}) 之比 ($\mu = H^*/L^*$) 作为描述滑坡运动性的特征参数(见图3高位滑坡运动特征),这一特征参数在物理意义上相当于整个滑道上的平均摩擦系数^[10]. μ 值只与动能和动摩擦系数有关,能够较好地表征滑坡的运动性. μ 值越大,平均摩擦系数越大,高位滑坡滑动时越困难; μ 值越小,平均摩擦系数越小,高位滑坡滑动时越容易. Legros 等对世界上203处在各种环境下产生的滑坡、运动距离、下落高度、滑坡面积以及滑坡运动特征值 μ 进行统计分析,结果表明发生在陆地上的滑坡 μ 值大约在0.1~0.6之间,发生在火山口的滑坡 μ 值约为0.1,发生在海底滑坡 μ 值约为0.05~0.1^[11]. 许强等为了研究汶川地震区内大型高位滑坡的运动特征,根据遥感影像从112处大型滑坡中筛选出由滑动转化为碎屑流并做远程运动的16处高位滑坡作为重点分析研究对象^[12].

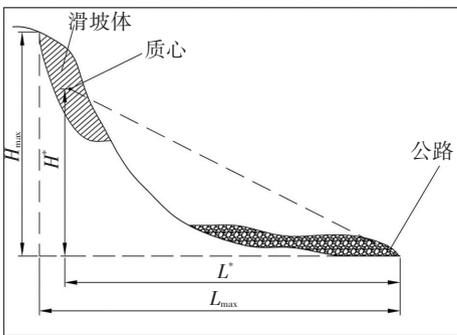


图3 高位滑坡运动特征

Fig.3 Characteristics of high-locality landslide motion

根据这16处高位滑坡体可得到了 L^*/H^* 与滑坡面积 S 的对数关系,见图4,对其进行线性拟合,拟合公式为

$$L^*/H^* = 0.5684 \ln s - 4.6235 \Rightarrow$$

$$H^* = \frac{L^*}{0.5684 \ln s - 4.6235},$$

$$R^2 = 0.6427. \quad (1)$$

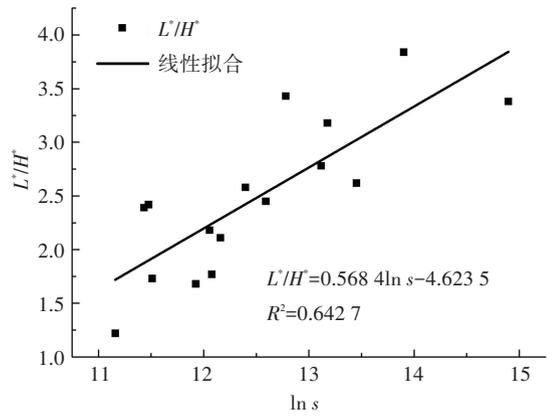


图4 L^*/H^* 与滑坡面积 s 的对数关系

Fig.4 The relationship diagram between L^*/H^* and $\ln s$

由式(1)可知,当面积为 S 的高位边坡在地震作用下发生滑动的最远距离为 L^* 时,其质心点临界高度约为 H^* . 故可以通过此公式来判别高位边坡在地震作用下发生崩塌滑坡是否会对线路工程造成威胁. 当高位边坡的质心点高程 $H < H^*$ 时,则不会威胁到线路工程,如图5所示,尽管在地震作用下发生崩塌但是由于其质心点高程不够,致使其无法达到坡脚并威胁线路工程;而当高位边坡的质心点高程 $H > H^*$ 时,则有可能威胁线路工程. 需要说明的是,式(1)既可以采用滑坡体的表面面积 S 也可以采用总体积 V ,两者都是灾害规模的表征方式并且之间存在一定的关系. 但是较难准确预测地震作用下滑坡可能的滑动深度,而表面面积 S 却可以准确得到. 因此,本文在对地震触发高位崩塌滑坡的灾势预测时只考虑表面面积 S . 该方法能够在选线设计中指导线路工程的方案比选精度.

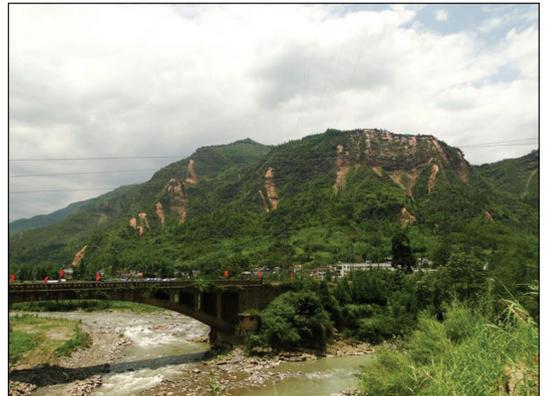


图5 4.20 芦山地震高位崩塌滑坡

Fig.5 The high-locality landslide triggered by 4.20 Lushan earthquake

结合以上分析及实地调查发现,在地震作用下,高位边坡须同时满足能量和路径两种必要条件,才能判定其是否会对线路造成危害. 所谓满足能量条件是指使高位崩塌体滑动到路域以内时所需具有足够的重力势能. 而所谓满足路径条件是指其滑动时

的运动路径. 段书苏等对芦山地震实地调查发现, 在 VII 度及以上地震烈度区确定的 1 754 个地震触发崩塌滑坡点中, 崩塌滑坡个数的优势方向与自然坡体的优势坡向相吻合^[13-14], 因此本文将高位边坡的主坡向做为滑动的优势方向. 但是高位边坡并非都会沿着边坡主坡方向一滑到底, 如图 6 所示, 青川马鹿乡老鹰岩危岩首先沿边坡坡向滑动到冲沟 1 中, 然后由冲沟 1 滑向村庄. 经过这一路径不仅增长了其滑动路径的长度, 同时在冲向冲沟 1 转向时也消耗了部分动能, 因此路径是必须要考虑的要素.

主要因子, 并对其进行分级赋值, 适用于我国西部地区地震崩塌滑坡的预测^[16], 计算式为

$$H = (S_i \times S_a \times S_h) \times (T_s + T_p). \quad (2)$$

式中: S_i 为岩性条件系数; S_a 为坡角影响系数; S_h 为坡高影响系数; T_s 为地震强度系数; T_p 为降水强度系数; H 为边坡危害程度. 当 $H < 264$ 时, 所有边坡都是稳定的; 当 $H > 396$ 时, 边坡均失稳; H 值处于二者之间时, 边坡既有可能稳定又可能失稳.

式(2)表明了地震崩滑的产生是外部因素(地震、降雨)相叠加作用于内部因素(坡高、岩性、坡角)的结果. 最后, 计算研究区内稳定边坡和失稳边坡的综合指标值, 进而确定地震崩滑发生临界值.

2 案例分析

选取西藏地区通麦-105 道班段作为研究区域, 该区域是川藏公路的重要组成部分, 是一既有改建工程. 区内地震活动频繁, 新构造运动强烈, 地质构造错综复杂, 岩体破碎, 松散失稳, 降水丰沛, 海洋性冰川广泛分布, 河流水系发育, 河谷、沟谷侵蚀下切强烈, 使该段道路成为川藏公路全线地质灾害病种齐全, 灾害集中、频繁, 规模最大及损失最为严重的路段, 是典型的地震触发高位崩塌滑坡研究区域. 为此, 购买了关于该区域的资源 3 号, 高分 1 号卫星影像数据, 影像精度为 1 : 25 000.

2.1 研究区内的边坡划分

该研究区通过水文分析方法共判别出 804 处边坡. 然后, 通过 C# 与 ArcGIS 软件结合, 二次开发编程统计各边坡的平均倾向.

2.2 研究区内威胁线路工程的高位边坡判别

2.2.1 判断满足能量条件的高位边坡

假定边坡在地震作用下发生崩塌滑坡时, 其滑坡体的质心与形心重合. 首先, 求取各边坡单元的面积 S 及形心点; 其次, 利用 ArcGIS 的 Near 工具, 判断各边坡平面形心点到线路的垂直距离, 将其作为最远滑动距离 L^* ; 然后, 根据式(1)求取每一边坡形心点所对应的临界高度 H^* ; 再次, 利用 ArcGIS 的 Extract values to points 工具求取各个边坡形心点的高差 H , 并判别 $H > H^*$ 的边坡. 以通麦 - 105 道班地区为例, 判别结果如图 7 所示, 图中威胁线路的高位边坡是满足能量条件的高位边坡.

2.2.2 判断同时满足能量和路径条件的高位边坡

基于图 7 满足能量条件的高位边坡判断满足路径条件的高位边坡. 根据高位边坡的主坡方向及冲沟位置, 判断其滑动时可能的滑动路径, 将满足能量条件的高位边坡分为 3 类: 第 1 类高位边坡是指滑坡滑动路径既不存在缓坡也不经过支沟; 第 2 类高



图 6 老鹰岩地质灾害分布^[15]

Fig.6 The distribution diagram of geological hazards at Eagle rock

基于以上分析提出了高位崩塌滑坡是否会威胁到线路工程的判别模型, 判别方法如下.

满足能量条件判别方法: 当面积为 S 的一处高位边坡质心点到线路距离 L^* 已知时, 就可以根据式(1)判断其所对应的临界质心高度 H^* . 若此高位边坡的质心点高程 $H > H^*$ 时, 则可以认为该滑坡体满足能量条件, 故可以判定其为可能威胁到线路工程的高位边坡.

满足路径条件判别方法: 针对如上满足能量条件的高位边坡, 根据其主倾向优势方向及冲沟位置, 确定滑坡路径的水平投影长度, 并重新将其作为 L_1^* , 根据式(1)判断调整后的临界质心高度 H_1^* , 如果此时高位边坡的质心点高程 $H > H_1^*$, 则认为该滑坡体同时满足能量条件和路径条件, 故可以判定其为威胁线路工程的高位边坡.

在此基础上结合综合指标法预判高位边坡在地震作用下发生滑坡的可能性, 完成地震触发高位崩塌滑坡的灾势预测.

1.3 基于综合指标法预测研究区地震崩塌滑坡

基于威胁线路工程边坡的区划图, 采用综合指标法, 对地震触发的崩塌滑坡进行预测. 该方法是在对中国已有地震资料研究分析基础上, 将地层岩性构造、坡高、坡角、地震、降雨作为影响地震崩滑的

位边坡是指滑坡滑动路径不经过支沟但存在较长缓坡,如图8所示;第3类高位边坡是指滑坡滑动路径需经过支沟,然后由冲沟滑向线路工程. 对于第1类高位边坡可认为满足能量条件即可,而对于第2、3类高位边坡还需进行单独判断.

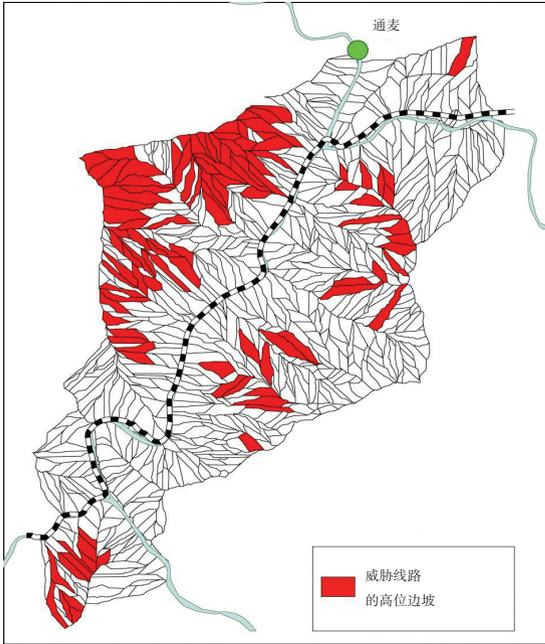


图7 满足能量条件的高位边坡

Fig.7 The high-locality slopes meeting energy condition

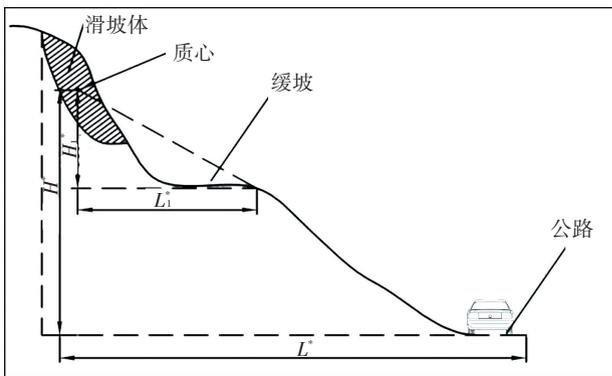


图8 第2类高位边坡示意

Fig.8 Schematic diagram of class II high-locality slopes

对于第2类高位边坡又可分为先陡后缓型和先缓后陡型高位边坡. 先陡后缓地形对高位滑坡的滑动不构成制约因素,滑坡受地震作用启动后就可利用陡坡迅速将重力势能转化成动能,而先缓后陡地形则对高位边坡滑动构成制约因素,滑坡受地震作用启动后,需要克服较长的缓坡地段,无法迅速将重力势能转化成动能,此时需要考虑先缓后陡型高位边坡是否能够滑过缓坡区. 由于已经经过能量条件判断,故只需要再判断第2类的先缓后陡型高位滑坡体是否能滑过缓坡区即可. 首先确定滑坡体质心到缓坡终点水平投影距离 L_1^* , 然后根据式(1)判断两点间的临界质心高度 H_1^* , 如果此时高位边坡的

质心点高程 $H > H_1^*$, 则认为该滑坡体能够通过缓坡地段,是威胁线路的高位边坡. 图9为第2类高位边坡平面图,该图中的高位边坡属于第2类高位边坡,其边坡面积 $S = 69\ 266\ \text{m}^2$, $L_1^* = 900.0\ \text{m}$, $H_1^* = 525.8\ \text{m}$, $H = 500.0\ \text{m}$, $H < H_1^*$, 故此高位边坡满足能量条件,不满足路径条件.

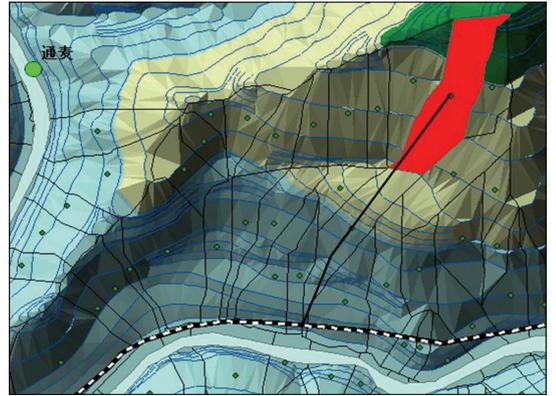


图9 第2类高位边坡平面图

Fig.9 Planar map of class II high-locality slopes

对于第3类高位边坡,首先需要根据滑动路径确定滑坡路径的水平投影长度,重新将其作为 L_1^* , 然后根据式(1)判断调整后的临界质心高度 H_1^* , 如果此时高位边坡的质心点高程 $H > H_1^*$, 则认为该滑坡体同时满足能量和路径条件,可以判定其为威胁线路工程的高位边坡. 图10为第3类高位边坡滑动路径平面图,该图中的高位边坡属于第3类高位边坡,需要确定其滑动路径. 滑动路径沿该边坡的主坡向优势方向滑动到冲沟后,沿冲沟滑向线路,如图10中黑线所示. 其边坡面积 $S = 192\ 184.5\ \text{m}^2$, $L_1^* = 3\ 032.0\ \text{m}$, $H_1^* = 1\ 322.9\ \text{m}$, $H = 1\ 275.0\ \text{m}$, $H < H_1^*$, 故该高位边坡满足能量条件,不满足路径条件. 此外,高位滑坡沿主坡优势方向滑向冲沟后会造造成一定的动能损失,动能损失大小与主坡优势方向和冲沟间的夹角大小有关. 本文未考虑动能损失,对预测结果更趋于安全.

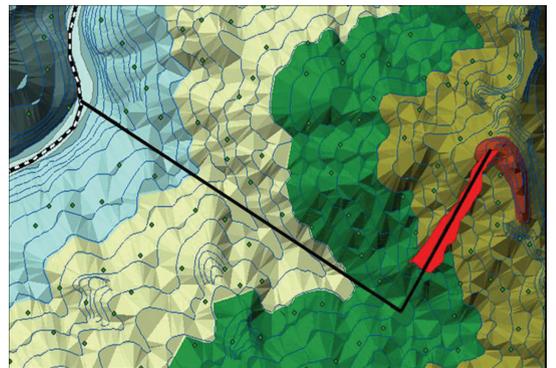


图10 第3类高位边坡滑动路径平面图

Fig.10 Planar map of class III high-locality slopes

综合第 1、2、3 类高位边坡,得到了威胁线路工程的高位边坡图,如图 11 所示. 该图中威胁线路工程的高位边坡比满足能量条件的高位边坡少了 32 处,进一步缩小了范围.

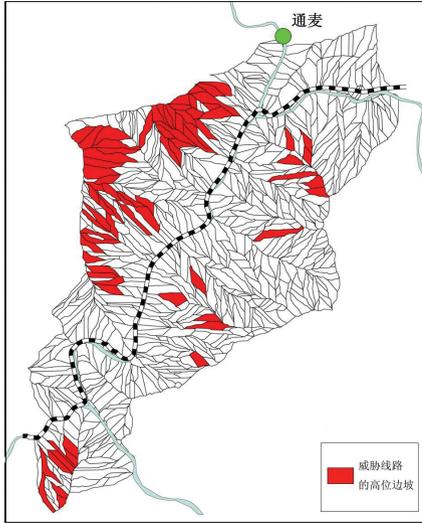


图 11 威胁线路工程的高位崩塌滑坡图

Fig.11 Zoning map of the high-locality slopes threatening the route

2.3 研究区地震触发高位崩塌滑坡判别

1) 区域气候特征. 研究区域气候温和湿润,年平均气温为 8~13℃,年降水为 1 000~1 400 mm;一年干湿两季气候,4 月份至 10 月份都属雨季,长达 7 个月,11 月份至次年 3 月份为旱季,仅 5 个月. 雨季降水占了全年降水总量的 85.5%,旱季仅占 14.5%;一年中雨季虽长,雨日也多,降水比率很高,但绝大多数都是小到中雨,大雨很少,没有日降水大于 50.0 mm 的暴雨发生.

2) 区域边坡平均坡度及边坡高度. 基于 C# 与 ArcGIS 软件二次开发编程统计划分好的每一边坡单元的平均坡度及边坡单元的相对高度,其中边坡平均坡度如图 12 所示.

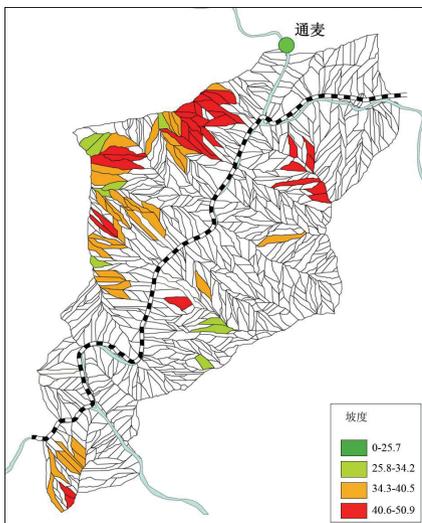


图 12 高位边坡平均坡度

Fig.12 The average gradient of high-locality slopes

3) 区域地层岩性及近场区地震构造. 根据已有地质资料可知,滑坡上覆底层主要为第四系全新统松散堆积体(第四系全新统崩坡积层 Q_4^{c+dl} 、第四系全新统滑坡堆积层 Q_4^{del} 、第四系上更新统冲洪积层 Q_3^{al+pl} 第四系全新统泥石流堆积层 Q_4^{sef} 、第四系全新统冲洪积层 Q_4^{2al+pl}). 下伏基岩主要为前震旦系冈底斯岩群 (AnZgd) 及前震旦系南迦巴瓦岩群阿尼桥片岩组 (AnZa). 区域内地震活动水平较高,在空间上分布极不均匀,大震多位于断裂带上. 估计未来百年在墨脱 8.6 级地震附近地区仍存在发生 7 级地震的可能性,但发生 7.5 级以上地震的可能性不大. 近场区内历史地震较多,部分地震震级较小,但距离场址较近,对场区造成一定的影响. 现代地震活动频度高,但震级较小,对场区的影响强度较弱. 对工程场区影响烈度最大者应当为 1950 年墨脱 8.6 级地震^[17-18],距场址的最小距离仅为 125.4 km,其近场区地震构造.

4) 地震崩滑预测结果. 基于综合指标法对研究区域内的边坡进行地震触发高位崩塌滑坡灾势区划,其判别情况如图 13 所示.

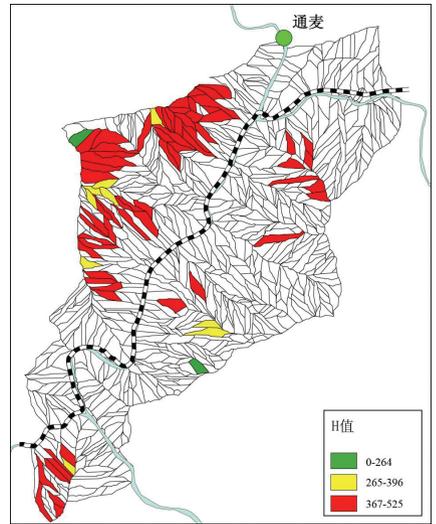


图 13 地震触发高位崩塌滑坡灾势区划图

Fig.13 Assessment of seismic high-locality landslide hazard zones

3 结 论

1) 提出一种线路工程地震触发高位崩塌滑坡灾势预测方法. 该方法是根据 Ms 8.0 汶川地震高位滑坡的特征建立起来的,可以在路域以外的复杂坡体上,辨识由地震触发的高位崩塌滑坡是否会滑动到路域内威胁线路工程.

2) 汶川实震表明,大量的高位崩塌滑坡是造成线路工程震害的主要威胁,因此当线路工程通过高烈度区时,需考虑防范来自线路用地界以外的高位崩塌滑坡. 所提出的地震触发高位崩塌滑坡灾势预

测方法可以为线路通过方案与绕避方案的比选提供决策依据。鉴于样本数仅有16处,研究工作仍属第一阶段,随着样本数据的不断增加,地震作用下威胁线路工程的高位崩塌滑坡灾势预测的精度将会进一步增加。

参考文献

- [1] 邱艳玲,姚令侃,朱颖,等.高烈度地震山区铁路减灾选线技术[J].西南交通大学学报,2014,49(6):972-980.
QIU Yanling, YAO Lingkan, ZHU Ying, et al. Disaster reduction technique of railway selection in high earthquake intensity mountainous regions [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(6):972-980.
- [2] 陈运泰,杨智娴,张勇,等.从汶川地震到芦山地震[J].中国科学地球科学,2013,43(6):1064-1072.
CHEN Yuntai, YANG Zhixian, ZHANG Yong, et al. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake [J]. Science in China Earth Sciences, 2013, 43(6):1064-1072.
- [3] 徐锡伟,陈桂华,于贵华,等.芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论[J].地学前缘,2013,20(3):11-20.
XU Xiwei, CHEN Guihua, YU Guihua, et al. Seismogenic structure of Lushan earthquake and its relationship with Wenchuan earthquake [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(3):11-20.
- [4] 姚令侃,陈强.5.12汶川地震对线路工程抗震技术提出的新课题[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):43-50.
YAO Lingkan, CHEN Qiang. New research subjects on earthquake resistant techniques of line engineering extracted from 5.12 Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3):43-50.
- [5] 崔鹏,何思明,姚令侃,等.汶川地震山地灾害形成机理与风险控制[M].北京:科学出版社,2011:37-49.
CUI Peng, HE Siming, YAO Lingkan, et al. The formation mechanism and risk control of Wenchuan earthquake mountain hazards [M]. Beijing: Science Press, 2011:37-49.
- [6] 王运生,徐鸿彪,罗永红,等.地震高位滑坡形成条件及抛射运动程式研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(11):2360-2368.
WANG Yunsheng, XU Hongbiao, LUO Yonghong, et al. Study of formation conditions and toss motion program of high landslides induced by earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11):2360-2368.
- [7] 谢谟文,蔡美峰,江崎哲郎.基于GIS边坡稳定三维极限平衡方法的开发及应用[J].岩土力学,2006,27(1):117-122.
XIE Mowen, CAI Meifeng, ESAKI T. GIS-based three-dimensional slope stability limit equilibrium method and application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1):117-122.
- [8] XIE Mowen, ESAKI T, ZHOU G, et al. GIS-based 3D critical slope stability analysis and landslide hazard assessment [J]. ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(12):1109-1118.
- [9] 谢谟文,蔡美峰.信息边坡工程学的理论与实践[M].北京:科学出版社,2005:46-53.
XIE Mowen, CAI Meifeng. The theory and practice of information of slope engineering [M]. Beijing: Science Press, 2005:46-53.
- [10] 方玉树.超大型滑坡动力学问题研究[J].水文地质工程地质,1988(6):20-23.
FANG Yushu. The dynamic problems research of very large landslide [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1988(6):20-23.
- [11] LEGROS F. The mobility of long-runout landslides [J]. Engineering Geology, 2002, 63(3):301-331.
- [12] 许强,裴向军,黄润秋.汶川地震大型滑坡研究[M].北京:科学出版社,2012:29-34.
XU Qiang, PEI Xiangjun, Huang Runqiu, et al. Large scale landslides induced by the Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science Press, 2012:29-34.
- [13] 段书苏,姚令侃,郭沉稳.芦山地震触发崩塌滑坡优势方向与机理[J].西南交通大学学报,2015,50(3):428-434.
DUAN Shusu, YAO Lingkan, GUO Chenwen. Predominant direction and mechanism of landslides triggered by the Lushan earthquake [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(3):428-434.
- [14] 段书苏,姚令侃,郭沉稳.山区复杂大流域地貌发育阶段判别方法及应用[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(3):147-153.
DUAN Shusu, YAO Lingkan, GUO Chenwen. Tendency prediction of collapse-landslide caused by earthquake based on the erosion cycle theory [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3):147-153.
- [15] 景泽.青川县马鹿乡老鹰岩地质灾害危险性评价及治理工程设计[D].成都:成都理工大学,2010:1-20.
JING Ze. Research on the deformation and failure mechanism and design of engineering management along Malu of Qingchuan Eagle rock 1# landslide [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010:1-20.
- [16] 丁彦慧,王余庆,孙进忠,等.地震崩滑预测方法及其工程应用研究[J].工程地质学报,2000,8(4):475-480.
DING Yanhui, WANG Yuqing, SUN Jinzhong, et al. Research on the method for prediction of earthquake induced landslides and its application to engineering projects [J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(4):475-480.
- [17] 刘玉海.墨脱8 $\frac{1}{2}$ 级地震宏观震害及烈度特征的考证[J].科学观察,1985,8(5):477-483.
LIU Yuhai. Study of the macroscopic seismic hazard and the intensity features of the motuo earthquake, tibet [J]. Journal of seismological research, 1985, 8(5):477-483.
- [18] 邵翠茹,尤惠川,曹忠权,等.雅鲁藏布江大峡谷地区构造和地震活动特征[J].震灾防御技术,2008,3(4):398-412.
SHAO Cuiru, YOU Huichuan, CAO Zhongquan, et al. Tectonic characteristics and Seismic Activities of Yaluzangbu Grand Canyon, Tibet, China [J]. Technology for earthquake disaster prevention, 2008, 3(4):398-412.

(编辑 魏希柱)