

单体危岩崩塌灾害风险评价方法

——以四川省丹巴县危岩崩塌体为例

许 强, 陈 伟

XU Qiang, CHEN Wei

成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059

National Specialty Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

摘要:在综合分析国内外危岩崩塌风险评价方法的基础上,以丹巴县双拥路危岩崩塌体为例,提出了适用于单体危岩崩塌的风险评价方法。根据蒙特卡洛法的基本原理及方法编制了危岩崩塌体的稳定性可靠度分析程序,计算了不同工况下危岩失稳的概率。同时,考虑地面建筑物对落石的阻挡影响,利用专业软件模拟落石的运动轨迹,并根据研究区的地形地貌特点进一步确定了落石的影响范围。在野外调查和收集当地社会经济资料的基础上,开展了承灾体的易损性研究,对资产的易损性进行了评价。根据危岩失稳的概率及承灾体的易损性分析,进一步得到不同工况下落石影响区内承灾体的经济损失水平,对危岩崩塌灾害的风险进行了定量评价。风险评价的结果可为危岩崩塌灾害影响区的城镇建设和规划提供科学依据,从而有效地规避风险和减灾防灾。

关键词:危岩崩塌;破坏概率;危险范围;易损性;风险评估

中图分类号:P694

文章标志码:A

文章编号:1671-2552(2009)08-1039-08

Xu Q, Chen W. Risk assessment method for single rockfall geo-disaster: a case study on the rockfall in Danba County, Sichuan, China. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8):1039-1046

Abstract: Based on international and domestic rockfall risk assessment practice, this paper has put forward the risk assessment method for single rockfall geo-disaster taking an example of rockfall in Danba County, Sichuan, China. Furthermore, reliance analysis program of dangerous rock stability is compiled based on basic principle of Monte-Carlo, and probability of instabilities under different conditions are calculated. At the same time, the author takes into account the impact of ground buildings which can block the falling rocks, motion trajectories of falling rocks are simulated in using professional software, moreover, in accordance with the topography of study area, the influence scope is delineated also. Vulnerability research of the disaster-bearing bodies and assets have been developed according to the field investigation and local social economic data. In light of above probability and vulnerability analysis, economic loss within the influenced area under different conditions and rockfall risk has been undertaken. These results can provide scientific basis for civil construction and planning in the influenced area to avoid and reduce geo-hazards effectively.

Key words: rockfall; damage probability; hazardous scope; vulnerability; risk assessment

崩塌主要是岩土在重力条件下产生的,崩塌体为不规则的松散块体,没有整体性。大型的岩石崩塌在岩石块体崩落后,会以流动的方式夹带超过 $10 \times 10^4 \text{m}^3$ 以上的岩屑体积,移动至远超过其原始岩坡高

度的距离^[1]。随着中国改革开放进程的不断推进,城镇建设高速发展,市政工程建设、水利水电建设、矿产资源开发等人类活动日益强烈,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害也呈现上升的明显态势,而崩塌灾害

收稿日期:2009-05-08;修订日期:2009-05-22

地调项目:中国地质调查局《西南山区城镇建设地质灾害风险管制方法及示范》项目(编号:1212010814015)资助

作者简介:许强(1968-),男,教授,博士生导师,从事地质灾害评价预测与防治处理研究。E-mail:xq@cdu.edu.cn

因发生时间不确定、崩落速度极快、主要沿垂直方向坠落的特点,可在较短的时间内造成巨大的危害,给人民的生命和财产安全带来了极大的威胁。因此,研究单体崩塌灾害的风险评估方法具有重大的理论和现实意义。

目前,针对崩塌灾害的研究工作主要集中于崩塌的形成和破坏机理研究、勘查评价、治理技术手段等方面,风险评估主要集中于对崩塌灾害的小比例尺区域性风险评估,对单体灾害风险评估的研究较少。国外对崩塌风险评估的相关工作起步较早,并获得了较为显著的成果,Pierson 等^[2-3]根据经验评分系统建立了最为简单的崩塌发生地点预测评价模型;Azzoni 等^[4]基于刚性体的力学理论和二维的统计分析模型对崩塌的运动轨迹及一些相关的参数(滚石的能量、弹起的高度、运移距离)进行了预测;Crosta 等^[5-6]利用空间分布方法研究了崩塌滚石到达的概率和崩塌的密度,为崩塌危险性评估和分区奠定了良好的基础。国内在崩塌灾害的风险评估方面也开展了相关的研究,胡厚田^[7]对各类落石的速度、崩落距离和运动轨迹进行了计算;唐红梅等^[8]对危岩的初始运动状态、碰撞过程、滑动过程、滚动过程等进行了较为深入的研究,获取了运动轨迹方程;张路青等^[9]对川藏公路南线(八宿至林芝段)滚石的发生频率进行了估计,通过遭遇滚石的概率及承灾体的易损性分析,得到了车辆和行人经过不同滚石区时遭遇滚石而致命的风险。在国内外单体崩塌灾害风险性评估研究成果的基础上,本文以四川省丹巴县城区双拥路危岩崩塌灾害为例,采用概率分析和数值模拟的手段,对危岩失稳的发生概率和最终的堆积区域进行研究,分析承灾体的易损性,初步建立了单体危岩崩塌灾害风险评估的技术方法。

1 丹巴县城区双拥路危岩崩塌的总体特征

丹巴县城区双拥路危岩位于丹巴县城,隶属章谷镇,地理坐标为 N30° 52'45.1"、E101°53'07.6"。该

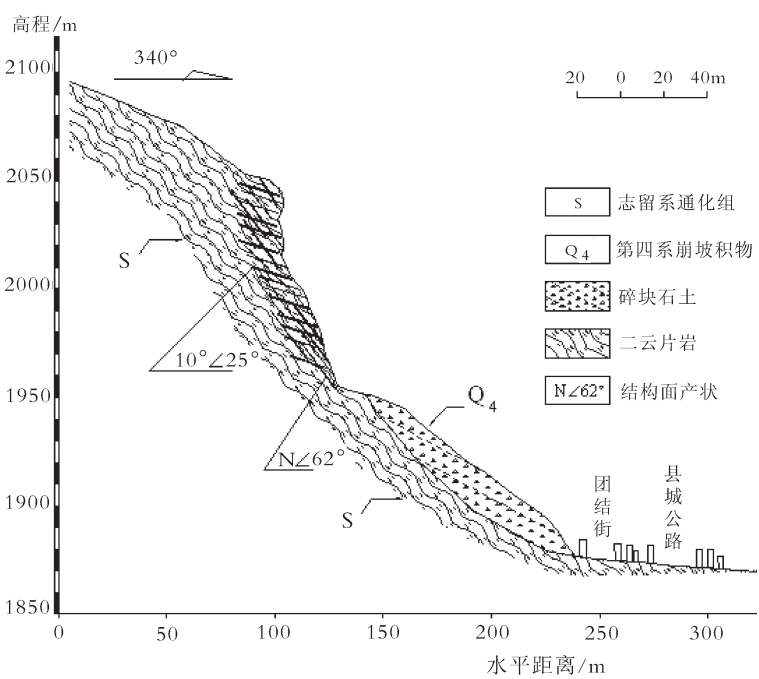


图 1 丹巴县双拥路危岩体剖面图
Fig. 1 Cross-section map of dangerous rock in Danba County

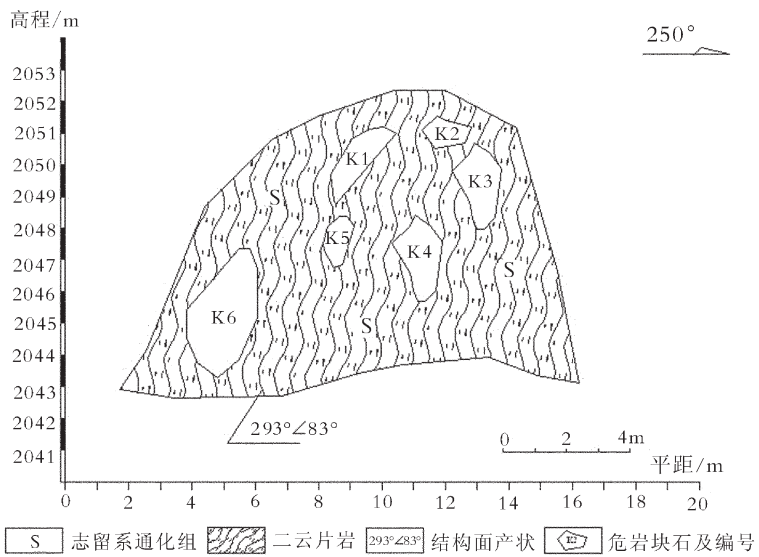


图 2 丹巴县双拥路危岩体立面图
Fig. 2 Elevation map of dangerous rock in Danba County

危岩体位于双拥路 13 号民房的东侧,丹巴建设街滑坡的西南侧。危岩体所处斜坡的坡度 60~70°,局部近陡立,下部形成多处凹腔,深度为 1~1.5 m(图 1、图 2)。危岩体的岩性为志留系通化组二云片岩,颜色为灰黑色。坡体表面基岩裸露,植被稀少,岩体风

化较严重,内部裂隙、结构面非常发育,较为破碎。主要控制性结构面有以下几组(图 1、图 2):陡倾坡外结构面,产状 $N\angle 62^{\circ}$;大角度斜交坡向陡倾结构面,产状 $293^{\circ}\angle 83^{\circ}$;缓倾坡外结构面,产状 $10^{\circ}\angle 25^{\circ}$ 。这 3 组结构面相互组合切割岩体,使局部岩体呈孤立状且外倾,最大块体尺寸为 $4\text{ m}\times 4\text{ m}\times 3\text{ m}$ 。

在暴雨的条件下,雨水可以通过裂缝直接入渗至坡体内部,增加岩体自重,并促使裂隙进一步发育,降低危岩体的稳定性,或受地震的影响,危岩体失稳。危岩体失稳后主要沿第 1 组和第 3 组结构面向下垮塌,破坏形式为滑塌式。

2 危岩危险性评价

2.1 危岩失稳破坏概率计算

失稳概率计算通常采用蒙特卡洛模拟法,该方法在目前的可靠度计算中是相对比较精确的。蒙特卡洛法又称随机抽样法、概率模拟法或统计试验法。该方法是通过随机模拟和统计试验来求解可靠性的近似数值方法。根据蒙特卡洛法的基本原理及方法可以编制危岩崩塌体的稳定性分析程序,程序中可考虑自重、裂隙水压力、地震作用等荷载的各种组合情况。在数据文件中输入各随机变量的均值与变异系数,程序最终输出的为危岩崩塌体的失稳概率值。在具体计算时,每抽样一次求得危岩的安全系数 K ,并对 K 进行安全判别,每次抽样结束后累计 K 小于 1 的次数,根据贝努利定理,其值与总抽样次数的比值为失稳概率的近似值。

危岩体的稳定性采用《三峡库区崩塌滑坡与塌岸地质灾害防治工程地质勘察技术要求》^①推荐的公式进行计算。根据大量工程实例,结合规范要求,主要考虑了 3 种工况和荷载组合:工况 1:天然工况,考虑自重和天然状态下的裂隙水压力;工况 2:暴雨工况,考虑自重和暴雨时的裂隙水压力;工况 3:地震工况,考虑自重、天然状态下的裂隙水压力和地震力。

在影响危岩体稳定的各个岩土参数中,危岩体结构面的抗剪强度指标(粘聚力 C 和内摩擦角 φ)受野外采样、室内试验、数据处理等多因素的影响,具有较大的不确定性。岩土体自身的重度参数变异系数较小,把它视作常量来处理危岩稳定性的计算结果不会产生过大的误差。因此,本文选取 C 和 φ 值作为随机变量。根据 C 、 φ 等强度参数具有正态分

表 1 危岩体结构面的物理参数
Table 1 Physical parameters of structure surface of dangerous rock

参数	粘聚力 C/kPa		内摩擦角 $\varphi/^{\circ}$	
	天然状态	饱和状态	天然状态	饱和状态
均值	41	36	35	32
方差	10.5^2	11.3^2	2.6^2	2.3^2

表 2 危岩体失稳破坏的概率
Table 2 Damage probability of dangerous rock

K_f	工况 1	工况 2	工况 3	K_f	工况 1	工况 2	工况 3
0.1	0	0	0	1.1	0.23	0.206	0.153
0.2	0	0	0	1.2	0.169	0.159	0.092
0.3	0	0	0	1.3	0.138	0.104	0.046
0.4	0	0	0	1.4	0.087	0.058	0.016
0.5	0	0	0.005	1.5	0.044	0.027	0.002
0.6	0.001	0.006	0.03	1.6	0.018	0.006	0
0.7	0.015	0.033	0.073	1.7	0.004	0.001	0
0.8	0.044	0.068	0.135	1.8	0	0	0
0.9	0.089	0.121	0.242	1.9	0	0	0
1	0.161	0.211	0.206	2	0	0	0
概率 P_i	0.149	0.228	0.485				

布的特点,首先利用蒙特卡洛法产生随机数(本次实验共产生 1000 个),代入下式:

$$R=\sqrt{-2L_rR_1\times\cos2\pi R_2}\tag{1}$$

然后将 C 和 φ 强度参数的均值和方差代入公式(2),可以得到 C 和 φ 值的分布直方图(图 3~图 6):

$$X=\sigma R+\mu\tag{2}$$

各结构面的抗剪强度取值主要根据勘察试验资料来确定,具体取值见表 1。

将随机方法取得的 1000 组 C 和 φ 值代入参考文献①的相关公式中进行稳定性计算,将计算所得的 1000 组稳定系数(K_f)进行统计分析,做出其分布曲线和期望值,利用下式最终模拟出该危岩体失稳破坏的概率。

$$P_f=N/N_1\tag{3}$$

式中, N 为模拟的总次数, N_1 为出现 $K_f<1$ 的次数。计算结果如表 2 及图 7 所示。

从以上计算结果可以看出,该危岩体在天然工况下失稳的几率较小,为 0.149;在暴雨工况下失稳的几率有所增加,达到 0.228;最容易失稳产生崩塌的工况状态为地震工况,失稳概率达到 0.485,易发

性相对较高。

2.2 危岩失稳后危害范围的评价预测

危岩失稳后形成的崩塌落石的运动形式可表现为滑动、滚动、跳跃、自由崩落等,运动轨迹不确定性

较大,主要影响因素有:危岩落石本身的大小、形状及其坚硬强度;边坡或山坡的高度、坡度、坡形;坡面组成物质及其表面起伏程度,覆盖层植被情况等。

危岩失稳后形成的落石运移距离可采用落石运

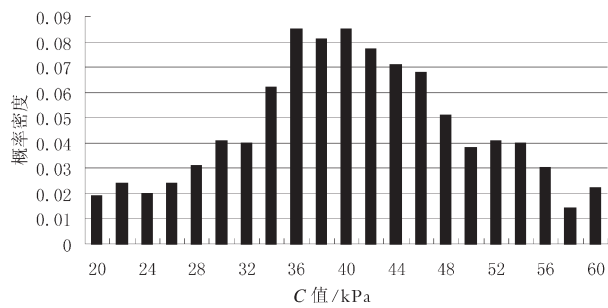


图 3 C 值概率分布直方图(天然状态)

Fig. 3 Histogram of probability distribution of C value (Natural status)

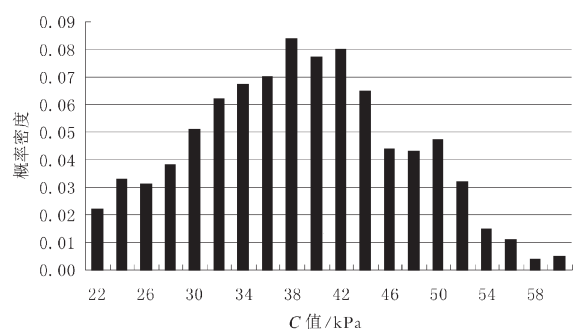


图 4 C 值概率分布直方图(饱和状态)

Fig. 4 Histogram of probability distribution of C (Saturated status)

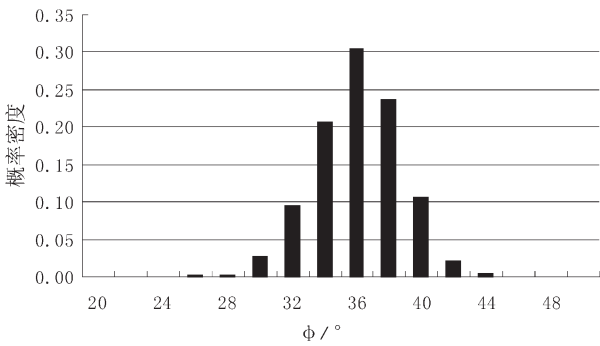


图 5 ϕ 值概率分布直方图(天然状态)

Fig. 5 Histogram of probability distribution of ϕ (Natural status)

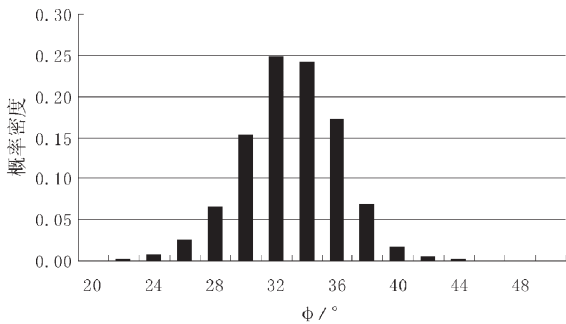


图 6 ϕ 值概率分布直方图(饱和状态)

Fig. 6 Histogram of probability distribution of ϕ (Saturated status)

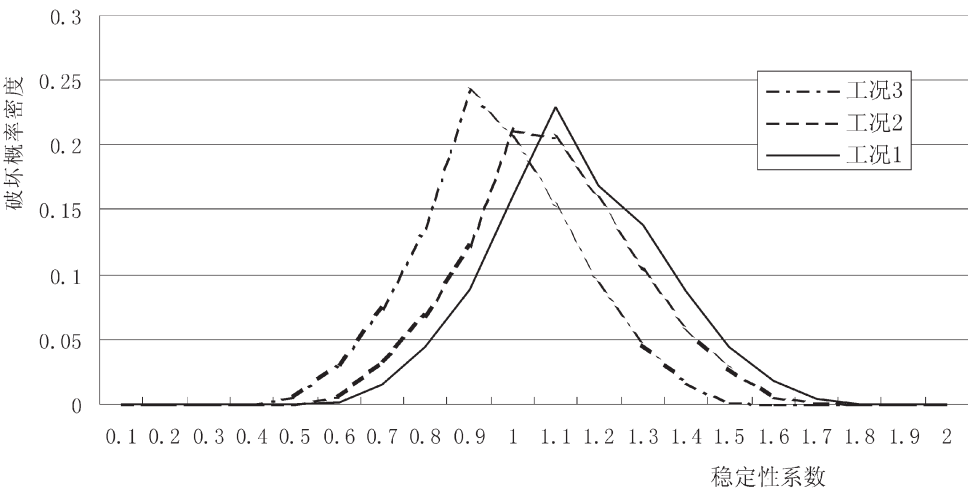


图 7 不同工况下危岩体的稳定系数和破坏概率

Fig. 7 Stability coefficient and damage probability of dangerous rock under different civil conditions

表 3 法向恢复系数及切向恢复系数的取值^[10]

Table 3 Normal components of restitution coefficient and tangential components of restitution coefficient

边坡坡面特征	法向恢复系数(R_n)	切向恢复系数(R_t)
人行道或基岩面	0.37	0.88
基岩斜面	0.33	0.85
植被覆盖的软土质边坡	0.29	0.82

动抛物线和坡面直线运动方程来计算:

$$\frac{1}{2}gt^2+(v_{y0}-qv_{x0})t+[Y_0-Y_1+q(X_1-X_0)]=0 \quad (4)$$

式中: v_{y0} 、 v_{x0} 为落石的初始速度; q 为坡表线段的斜率; Y_0 、 X_0 为落石的初始位置; Y_1 、 X_1 为直线段的起点坐标。如果 Y_2 、 X_2 为直线段的终点坐标,则 q 值为 $q=\frac{Y_2-Y_1}{X_2-X_1}$, t 为落石与坡面接触前耗费的时间:

$$t=\frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a}$$

式中, $a=g/2$; $b=V_{y0}-qV_{x0}$; $c=Y_0-Y_1+q(X_1-X_0)$ 。

通过以上公式可以计算出落石下落过程中与坡体表面碰撞点的坐标(X_c 、 Y_c),并得出在碰撞点处落石的入射速度^[10]:

$$V_i=\sqrt{V_{x0}^2(V_{y0}+g\cdot\frac{X_c-X_0}{V_{x0}})^2} \quad (5)$$

与坡面碰撞后,落石的能量将发生一定的损失,其速度也有所下降。在国内外的研究过程中,主要采用恢复系数来考虑碰撞过程中的能量损失,最常用的恢复系数是法向恢复系数(R_n)和切向恢复系数(R_t),碰撞后的法向速度和切向速度可定义为:

碰撞后的法向速度: $V_m=R_n\times V_{in} \quad (6)$

碰撞后的切向速度: $V_{it}=R_t\times V_{it} \quad (7)$

式中: R_n 、 R_t 分别为法向速度恢复系数和切向速度恢复系数; V_{in} 、 V_{it} 分别为碰撞前的法向和切向速度。目前,法向恢复系数和切向恢复系数的具体取值并没有明确的规定,主要根据野外边坡实际情况来取值。根据双拥路崩塌危岩体的质量、边坡坡面的岩土体特性, R_n 和 R_t 的具体取值见表 3。

对危岩体失稳后运移距离的预测主要考虑 3 种工况状态:天然工况、暴雨工况和地震工况。落石在运动过程中会与地面的建筑物发生碰撞,能量有所损失。不同的房屋结构对落石能量的吸收能力有所

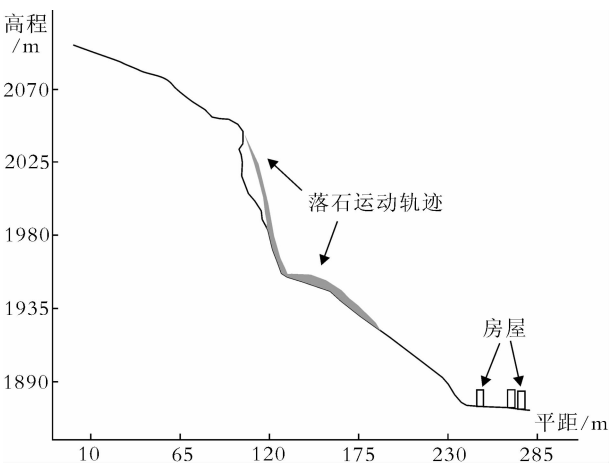


图 8 落石运动轨迹(天然工况和暴雨工况)

Fig. 8 The trajectories of falling rocks (Nature status and rainstorm status)

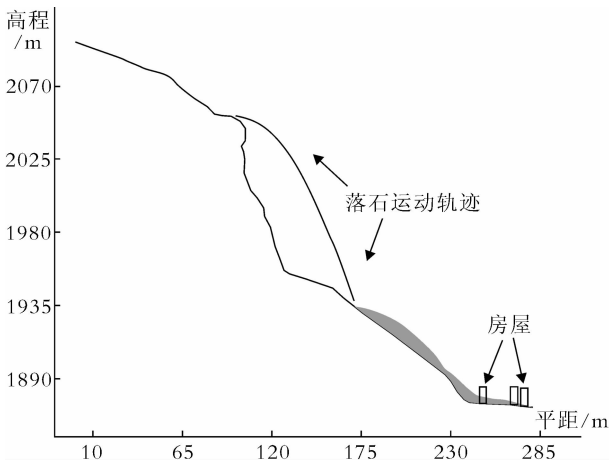


图 9 落石运动轨迹(地震工况)

Fig. 9 The trajectories of falling rocks (Seismic status)

差别。本文砖混结构的房屋能量吸收取值为 500 kJ,浆砌块石结构的房屋能量吸收取值为 100 kJ。考虑地面建筑物对落石阻挡的影响,采用落石分析专业软件对落石运动轨迹进行模拟,结果如图 8、图 9 所示。根据落石主要沿坡表凹陷地形运动的特征,在对危岩体内结构面的发育分布情况、坡体表面的植被情况、覆盖层的特征和地形地貌特征进行野外调查的基础上,综合危岩失稳后运动轨迹的模拟计算结果,可以确定危岩体的两侧及其前缘的影响范围,具体数值及范围见图 10 和表 4。

从图 8 和图 9 可以看出,由于受到地面建筑物

阻挡的影响,工况 1 和工况 2 中的落石仅对距离山脚最近的第一排建筑物造成了破坏;在地震的作用下(工况 3),落石的能量和起始速度都比前 2 种工况大,破坏力也更强。落石不仅对第一排建筑物造成了严重危害,第二排建筑物也发生了破坏。

表 4 不同工况下落石的水平运移距离及影响范围
Table 4 Horizontal motion distance and influenced scope of falling rocks under different conditions

工 况	工况 1 (天然工况)	工况 2 (暴雨工况)	工况 3 (地震工况)
水平运移距离/m	164.2	164.2	192.6
影响范围/m ²	6650	6650	8995

表 5 不同工况下承灾体的情况
Table 5 Disaster-bearing bodies status under different conditions

工况	人口	房屋建筑/间	道路/m
工况 1	28	5	54
工况 2	28	5	54
工况 3	62	14	194

3 危岩崩塌灾害易损性评估

危岩崩塌灾害可以定义为:在一定区域和给定的时间段内,崩塌灾害可能导致的对该区域的所有人、财、物的最大损失。在危岩崩塌灾害的影响范围内,财产价值越大、人口数量越多,崩塌灾害易损性就越大。根据承灾体分类的原则,可将承灾体分为人员、房屋建筑、道路等,针对不同类别的承灾体分别进行调查,结果见表 5。

有学者认为,房屋资产是城市财产的主体,房屋分布与人口密度、室内财产、城市生命线等有着密切的相关性,主张对资产的易损性进行评价^[1]。因此,本文在对崩塌危害影响范围内的承灾体类型、数量进行现场实际调研和室内统计分析的基础上,采用分类统计方法按以下评估模型对崩塌灾害易损性进行评价:

$$V(u)=\sum_{i=1}^n W_i \cdot F(s)_i \tag{8}$$

式中: $V(u)$ 为崩塌灾害承灾体的总易损性, W_i 为第 i 类易损体的平均单价, $F(s)_i$ 为第 i 类易损体的实际

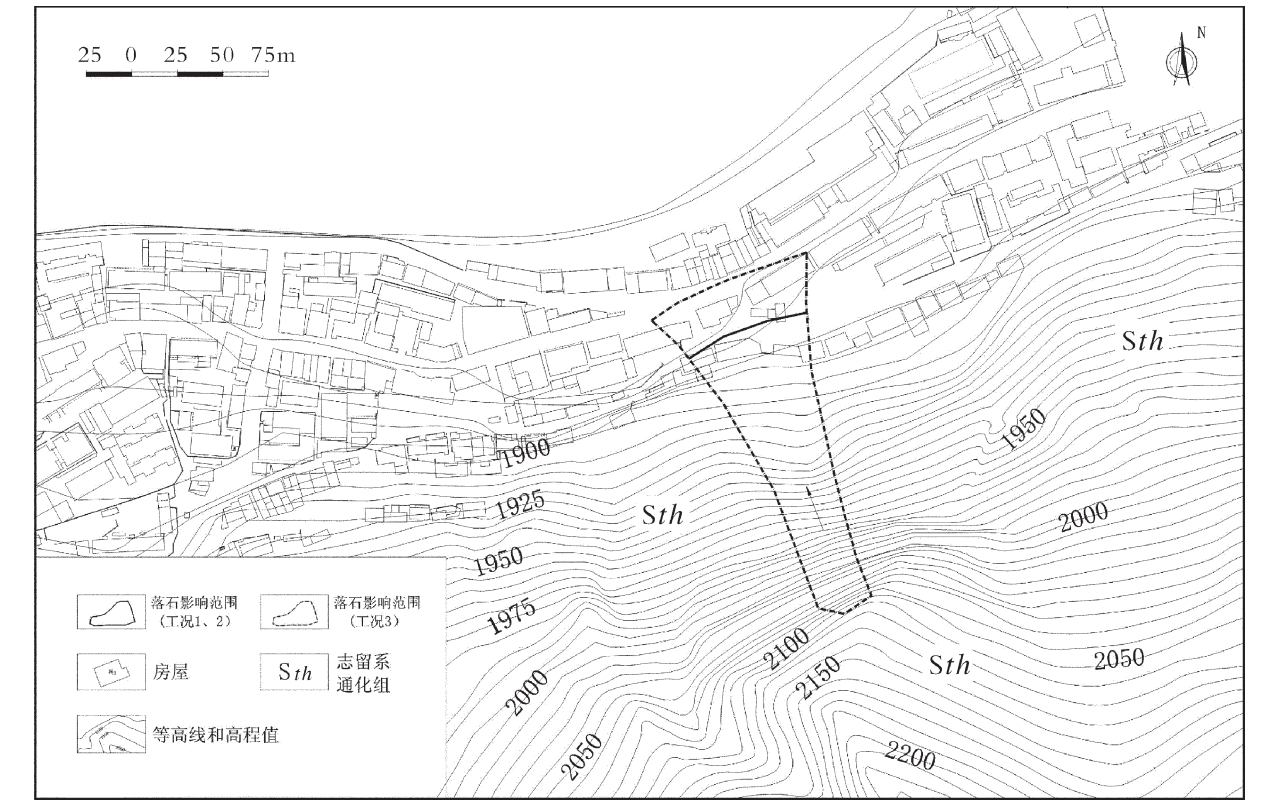


图 10 丹巴县双拥路危岩影响范围平面图

Fig. 10 Plane map of influenced scope by rockfall in Danba County

表 6 崩塌灾害承灾体的总易损性
Table 6 Total vulnerability of disaster-bearing bodies in rockfall disaster

工况	房屋结构	总面积/m ²	单价 (元/m ²)	受损 概率	室内财产 /万元	总价值 /万元	总易损性 /万元
工况 1 和 2	砖混	18.20	900	0.41	12.00	13.64	14.72
	石头	552.09	500	0.28	5.00	32.60	
工况 3	砖混	618.96	900	0.41	325.00	380.71	167.37
	石头	665.44	500	0.28	7.00	40.27	

表 7 经济损失等级划分^[12]
Table 7 Classification of economic loss

一级	二级	三级	四级	五级
<20 万元	20~50 万元	50~100 万元	100~500 万元	>500 万元

表 8 经济损失计算结果
Table 8 Results of economic loss

工况	总易损性 /万元	崩塌发生 概率	经济损失 /万元
工况 1	14.72	0.149	2.19
工况 2	14.72	0.228	3.36
工况 3	167.37	0.485	81.17

面积, i 为受灾体的类型。通过现场实地调查和对当地社会经济资料的收集, 对不同工况下双拥路的崩塌灾害承灾体的总易损性进行分析, 具体数值见表 6。

4 危岩崩塌灾害风险性评估

危岩崩塌灾害风险可以定义为危岩失稳破坏产生不良后果的可能性, 即危岩崩塌风险包括危岩发生破坏的可能性及其所产生的后果(损失)2 个方面, 可以表示为:

$$R=f(P,C) \tag{9}$$

式中: R 为危岩崩塌风险, P 为危岩失稳破坏的概率, C 为危岩失稳后造成的损失。

危岩失稳破坏的概率在前文已作了分析论述, 危岩失稳后造成的损失除了经济损失外还包括人员伤亡的损失。由于资料的限制, 在本文中, 危岩崩塌灾害风险性评估仅考虑经济损失的风险。经济风险主要内容为: 工程修复、处理及崩塌灾害造成的其他方面的损失, 经济风险分级标准见表 7。经济损失采用公式(10)来计算, 计算结果见表 8。

$$S=\sum_{i=1}^nV_i\cdot W_i\cdot A_i\cdot P \tag{10}$$

式中: S 为经济损失, i 为承灾体种类数, V_i 为第 i 类承灾体的易损性值, W_i 为承灾体的平均单价, A_i 为承灾体的计量单位, P 为危岩失稳破坏的概率。

根据危岩失稳后造成的经济损失的计算结果(表 8), 参照经济损失等级划分表(表 7), 工况 1 和工况 2 的经济损失均属于一级, 工况 3 的经济损失属于三级。

5 结 论

(1) 本文从危岩崩塌灾害单体的发育环境、自身特征和受其危害的承灾体的社会经济状况出发, 初步建立了一套从野外调查危岩失稳概率分析→危岩危害范围预测→承灾体易损性分析→危岩崩塌风险评价的技术方法体系。

(2) 采用蒙特卡洛法对危岩体失稳概率进行了分析, 主要考虑了 3 种工况, 结果表明危岩体在地震工况下最容易失稳破坏, 其失稳概率为 0.485。

(3) 针对危岩失稳后形成的落石, 本文采用落石分析专业软件对落石运动轨迹进行模拟, 并根据野外调查的坡体和地形情况, 确定了落石在不同工况下的危害范围。

(4) 通过调查崩塌危害范围内承灾体的数量和类型, 采用分类统计方法对崩塌灾害易损性进行评价, 工况 1 和工况 2 的总易损性值为 14.72 万元, 工况 3 的总易损性值为 167.37 万元。

(5) 在危岩体失稳概率评价、危害范围预测和崩塌灾害易损性分析的基础上, 进行了危岩崩塌灾害风险性评估, 3 种工况的经济损失分别为 2.19 万元、3.36 万元和 81.17 万元。

本文中提出了针对单体危岩崩塌的风险评价方法, 并以丹巴县双拥路危岩崩塌为例进行了风险评

价。所采用的技术方法和研究思路对于其他危岩崩塌的风险评价具有一定的参考价值和借鉴意义。

致谢:张一凡、周建伟、陈成名、张帅等在危岩崩塌灾害体、承灾体调查和制图过程中做了大量的工作,在此表示衷心的感谢。

参考文献

[1]Oldrich Hungr. A review of the classification of landslides of the flow type[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2001,17: 221—238.

[2]Pierson L A, Davis S A, Van Vickle. Rockfall Hazard Rating System: Implementation Manual[R]. Federal Highway Administration Publication SA-93-057 ,1990: 172.

[3]Cancelli A, Crosta G.Hazard and risk assessment in rockfall prone areas[C]//Proceedings Conference on Risk and Reliability in Ground Engineering.1993:177—190.

[4]Azzoni A, La Barbera G, Zaninetti A. Analysis and prediction of rock falls using a mathematical model[J]. International Journal of Rock

Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical,1995,32(7):709—724.

[5]Crosta G B, Agliardi F. A new methodology for physically based rockfall hazard assessment[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2003, 3:407—422.

[6]Guzzetti F. Rockfall hazard and risk assessment along a transportation corridor in the Nera Valley, central Italy[J]. Environmental Management, 2004, 34(2):191—208.

[7]胡厚田.崩塌与落石[M].北京:中国铁道出版社,1989.

[8]唐红梅,易朋荧.危岩落石运动路径研究[J].重庆建筑大学学报, 2003,25:18—21.

[9]张路青,杨志法,张英俊.公路沿线遭遇滚石的风险分析——方法研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24:5544—5548.

[10]吕庆.边坡滚石运动的计算模型[J].自然灾害学报.2003,(12):81—82.

[11]唐川.城市泥石流流易损性评价[J].灾害学,2005,20: 13—15.

[12]陈云.边坡风险评估系统及其应用研究[D].重庆大学,2007:21—23.

① 三峡库区地质灾害防治工作指挥部.三峡库区崩塌滑坡与塌岸地质灾害防治工程地质勘查技术要求. 2004: 67—68.