

巩尚卿, 叶四桥, 杨威, 等. 落石灾害危险性概率评价方法[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 215-219. [Gong Shangqing, Ye Siqiao, Yang Wei. Probabilistic Method for Rockfall Hazard Evaluation [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 215-219.]

落石灾害危险性概率评价方法^{*}

巩尚卿¹, 叶四桥^{1,2}, 杨威³

(1. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074; 2. 重庆市地质矿产勘察开发局博士后工作站, 重庆 401121;
3. 江苏省交通科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘 要: 落石灾害危险性应从灾害发生可能性与灾害致灾严重性进行评价, 并以落石致灾概率表征致灾可能性, 以人员损失和经济损失表征致灾严重性; 以落石崩落、落石运动至威胁区域的可能性研究成果为基础, 通过分析致灾过程, 将落石致灾概率分为危岩崩落概率、落石到达威胁区域概率、落石击中承灾体概率三部分, 分别进行概率评价, 并提出了量化算法; 借鉴大坝、滑坡相关研究结果, 结合落石灾害自身的特点, 分析了承灾体的易损性, 设定落石灾害可接受风险水平, 提出了落石灾害经济及生命可接受风险建议值; 应用本概率评价方法于重庆万州菜地沟危岩段, 能够量化判定落石致灾危险程度, 在工程应用中可有效评估落石灾害, 并为后期危岩防治提供了决策基础。

关键词: 落石灾害; 危险性评价; 概率分析; 风险水平

中图分类号: P642.5; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)04-0215-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.04.039

落石灾害是山区常见自然灾害, 其危险性直接体现在对生命、财产的破坏, 间接体现在对社会和环境产生的负面影响上。落石灾害危险性评价是对灾害发生的可能性和严重性进行预评估, 进而确定灾害可能的范围、规模、频次与影响程度, 为落石防护工程的开展提供根据、标准和理论基础。目前, 对落石灾害危险性评价多采用经验评级方法, 国外如加拿大、美国, 分别建立政府性的评价体系^[1-2], 应用于各自的铁路、公路系统, 并已在实际工程中取得良好效果。国内如胡厚田^[3-4]将模糊理论应用于宝成铁路一段, 综合宏观区段预测, 提出了稳定度评判方法。张路清^[5-6]计算了川藏公路八宿-林芝段遭遇滚石的年平均概率, 使用多评价因子对区段滚石灾害经验评分。郑黎明^[7]等对宝成铁路略广段进行了落石灾害中长期发展预测。但总的来说, 落石灾害评价仍很难满足实际需要。通过分析落石灾害的致灾过程, 以落石致灾概率和承灾体损失表示落石致灾可能性和严重性, 由模糊主观的定性评价转向清晰客观的定量评价, 设置相应风险水平, 建立落石灾害危险性概率风险评价体系。

1 落石致灾概率

落石灾害的发生包含两个部分: 首先是危岩落石崩落的发生, 若危岩体未发生崩落, 则没有危险源, 即无落石灾害致灾可能性; 然后是落石事件造成危害的既成事实。比如在无人山岭地区发生跨岩事件, 但是由于没有对人民群众的生产生活产生具体而严重的影响, 因此其没有落石灾害危险性, 落石致灾的概率为0。基于对落石致灾过程的分析, 可将落石致灾概率分成三部分: ①危岩崩落概率; ②落石到达威胁区域的概率; ③落石击中承灾体的概率。

1.1 危岩崩落概率

危岩崩落概率是对危岩崩落可能性的定量表示, 目前危岩崩落可能性的评价方法主要有三种: 危岩稳定系数法^[8]、危险度法^[9]、历史落石频率与情况调查。本文对以上三种方法进行了经验概率转化, 来满足各种阶段、不同评价区域落石灾害危险性概率评价的需要(表1)。在实际操作中根

* 收稿日期: 2014-03-24 修回日期: 2014-05-01

基金项目: 国家自然科学基金(51108488); 重庆市高校青年骨干教师资助计划; 重庆市自然科学基金(CSTC2010BB4265); 重庆市博士后科研项目特别资助项目; 重庆市公路局科技项目; 重庆市高校创新团队建设计划资助项目(KJTD201305)

作者简介: 巩尚卿(1987-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事岩土与地质灾害防治研究工作。

E-mail: 740478344@qq.com

据具体情况选择合适的方法来获取概率,可选择较方便准确的方法进行计算,若条件允许可三种方法同时使用做对比分析。

表1 危岩崩落概率评价

经验崩落概率		0.99	0.9	0.5	0.1
稳定系数法	落石形成方式	不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定
	滑塌	<1.0	[1.0, 1.1)	[1.1, 1.3)	>1.3
	倾倒	<1.0	[1.0, 1.2)	[1.2, 1.5)	>1.5
	坠落	<1.0	[1.0, 1.2)	[1.2, 1.5)	>1.5
危险度法	评价描述	极度危险	危险	欠安全	安全
	分数	≥80	70	60	≤40
落石历史调查	落石频率	≥0.6次/年	0.6~0.2次/年	0.2~0.06次/年	≤0.06次/年

1.2 落石到达威胁区域概率

危岩崩落后若运动能力急剧下降,并在到达威胁区域前处于静止状态,则不会导致严重后果,致灾可能性为0。落石能否自崩落运动至威胁区域,要考虑这个过程中的时空条件,包括落石本身的运动能力,落石运动过程中受到的阻碍因素(坡段特征,被动防护设施)。将运动条件分为七类影响因子:落石形状、落石尺寸、边坡高度、边坡坡度、边坡形状、坡表特征、防护措施。前两项表征落石本身运动能力,后五项表征运动阻碍因素。对此七类因子进行分级定性描述^[10],而后按美国公路局 RHRS 方法对每一类因子分四级评分,得分分别为1、3、9、27分(即3的0次、1次、2次、3次幂)。设定特征值 IP ,表征落石到达威胁区域可能性大小,其计算公式如下:

$$IP = \frac{\sum_{i=1}^n IP_i}{n} \quad (1)$$

式中: IP_i 为第 i 类影响因子量化得分值; n 为影响因子总数,取7。求出 IP 值后,将 IP 值转换成落石运动到威胁区概率 P_d (表2)。

表2 基于 IP 值的落石到达威胁区概率

IP 值	1	3	9	27
概率百分比/%	1	10	50	100

注:非固定 IP 值按内插法取值,例如 $IP = 18$,则崩落概率为75%

对于某些坡段,若坡段未设置防护措施,则按以上七类影响因子进行评价;采取部分主动或被动防护措施,为一般防护;若已经充分设置了被动拦截防护设施,则特征值 IP 可直接取1,此处充分设置指进行了完善的勘查治理,包括主被动防护措施的综合采用,对于削坡、爆破等不利情况,则应在原有评价级别的基础上提高一个层级。

1.3 落石击中承灾体概率

落石事件发展成落石灾害仅仅通过前两者是不够的,危岩崩落后,且到达威胁区,仍然可能未导致落石灾害,落石可能未击中任何人员、建筑、车辆

等承灾体,只有当落石确实造成人员伤亡,建筑物车辆损坏的情况下,落石灾害才真正形成。所以要获得致灾概率还需要计算落石击中承灾体的概率,落石击中承灾体的概率是落石致灾概率的最终反应。

承灾体种类繁多,难以进行逐个核算,按照落石灾害的破坏效应,可划分承灾体基本类型,如:人员、工程设施、交通设施、生命线工程与室内财产。本文选取代表性的承灾体进行概率分析^[11],如建筑物、人员、公路车辆等。

(1) 落石击中建筑物

$$P_B = \frac{L_B}{L_w} \quad (2)$$

式中: P_B 为落石击中建筑的概率; L_B 为建筑物总长,包括各个受威胁的建筑物横向长度之和,即 $L_B = \sum L_{Bi}$; L_w 为威胁区横向总长度。

(2) 落石击中人员的概率

① 落石击中建筑物中人员

建筑物中存在人员具有一定时间性,即某些时段,人员较多,某些时段,几乎没有人。所以计算人员伤亡概率首先应当考虑人员出现在建筑物内的概率:

$$P_s = \frac{T_1}{T} \quad (3)$$

式中: P_s 为人员出现在建筑物内的时间概率; T_1 为人员出现在建筑物内的年总时间,工厂等工作场所以工作时间计算;超市、商场等以营业时间计算,普通住宅以在家时间计算; T 为1年时间。

建筑物存在人员的情况下,人员往往散布,密度也不恒定。此处简化处理:若落石击中建筑物,设定人员伤亡概率为 $Pr = 0.5$ 。则落石击中建筑物内人员概率为:

$$P_h = P_s \times P_r \quad (4)$$

② 落石击中行人

一般来说,落石威胁区的长度是一定的,当威胁区内通行人员的时候,应当计算落石击中行人的概率。本文采取保守,偏于安全的算法,认为人员以一定间隔步行,均匀持续通过威胁区;每个行人占据长度为 L_p (m);行人间距为 L_{pd} (m);步行速度为 V_p (km/h);威胁区内人员通行年总时间 T_p ;统计年人流量为 Q_p 。这样,落石击中行人的概率为:

$$P_x = \frac{T_p L_p}{365 \times 24 \times (L_p + L_{pd})} \quad (5)$$

$$T_p = \frac{L_p + L_{pd}}{V_p} \times Q_p \quad (6)$$

(3) 落石击中车辆

① 落石击中静止中的车辆

因各种原因,如车辆阻塞交通,道路中断,可能导致车辆在威胁区内滞留,则此种情况下的车辆即为静止车辆。若假设沿着公路汽车是均衡分布;汽车的长度设为 L_1 (m);车辆间距 L_d (m);一年内威胁

表 3 落石灾害引起设施内的死亡人数

设施使用频率	人员密集程度 / (10^{-2} 人 / m^2)	常见设施	潜在死亡人数
高	> 10	住宅小区、百货商店、写字楼、厂房、学校、医院等	3
	5.0 ~ 10	平房房屋、公共汽车站、火车站站台、高流量公路	2.5
中	2.5 ~ 5.0	室内用停车场、室内用体育场馆、教堂、道观、寺院、	2
	1.5 ~ 2.5	铁路与公路交叉口、天桥、地下通道入口	1
低	0.75 ~ 1.5	高使用率的娱乐场地、露天大型停车场、园艺花园、中流量公路	0.25
	0.1 ~ 0.75	低使用率的娱乐场地、低流量的公路	0.03
	< 0.1	极少人的郊区、野外公园、弃置的采矿矿场、人迹罕至区域	0.001

区域内车辆滞留总时间为 T_d (h)。这样落石击中静止车辆的概率为:

$$P_{cj} = \frac{T_d L_1}{365 \times 24 \times (L_1 + L_d)} \quad (7)$$

② 落石击中行驶中的车辆

与落石击中行人一样, 在车辆通行总时间 T'_d (h) 内, 假定车辆以一定间距, 连续不间断通过威胁区。另外, 若落石阻挡前方道路, 当车辆具有一定速度无法躲避落石时, 还应考虑此影响长度 L_s (m), 车辆长度 L_1 (m), 车辆间距 L'_d (m), 车辆速度 V_c (km/h), 车流量为 Q (量 / 年)。则落石击中车辆的概率为:

$$P_c = \frac{T'_d (L_1 + L_s)}{365 \times 24 \times (L_1 + L'_d)}, \quad (8)$$

$$T'_d = \frac{L_1 + L'_d}{V_c} \times Q. \quad (9)$$

根据以上公式, 可计算出落石击中承灾体概率, 结合前两项危岩崩落概率和落石到达威胁区概率, 可以得到落石最终致灾概率, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} & \text{落石致灾概率} = \text{危岩崩落概率} \times \\ & \text{落石到达威胁区概率} \times \text{落石击中承灾体概率}. \end{aligned} \quad (10)$$

2 落石致灾严重性

落石致灾概率体现了落石灾害发生的可能性, 落石灾害严重性也即落石灾害的致灾后果, 则通过承灾体损失来表示。从损失性质上可分为人员损失和经济损失。

2.1 人员损失

人员损失以潜在死亡人数表示, 可参考其他地质灾害引起人员死亡的情况^[12], 并结合落石灾害导致人员死亡特点, 如偶然性、散落性较强, 同时应考虑落石事件现场实际情况。按照设施使用频率与人员密集程度进行综合评定潜在死亡人数(表 3), 也可根据经验确定。

2.2 经济损失

落石灾害具有偶然性和散落性。某块落石击中承灾体都是具体的, 比如某一栋建筑、某几个行人、某辆汽车等等。所以为简化计算做如下假定: 威胁区内建筑物是相同的, 其价值也是相同的, 且落石击中某个建筑物是随机的; 各建筑物内物品、设施也是相同的; 威胁区内车辆的价值相同, 可按照地

区平均经济水平设定具体值。经济损失计算的核心是确定各种承灾体的易损性, 按照落石尺寸的大小来间接反映承灾体的易损性(表 4), 则落石造成的经济损失可按式计算:

$$S = \sum W_i \times V_i. \quad (11)$$

式中: W_i 为承灾体价值, 如建筑物、车辆等; V_i 为承灾体易损性。

表 4 基于落石体积的易损性取值^[13]

	承灾体	易损性取值
固定建筑物 或车辆等	落石方量 $< 1 \text{ m}^3$	0.10
	落石方量 $1 \sim 5 \text{ m}^3$	0.20
	落石方量 $> 5 \text{ m}^3$	0.30

3 落石灾害可接受风险水平

对应于落石灾害导致的人员损失和经济损失, 其可接受风险水平也从生命风险和经济风险两个方面进行设定, 风险水平的设定是为了衡量灾害预期可承受的程度, 具体要根据当地经济、社会发展水平、灾害防治技术、资金配置来综合考虑。

3.1 生命风险

生命风险参照香港地区滑坡灾害可接受风险标准^[14], 结合落石灾害的特点, 以死亡人数和落石致灾概率划分为四个风险水平: 可接受、满足 ALARP 原则、严格审查、不可接受。曲线如图 1 所示。

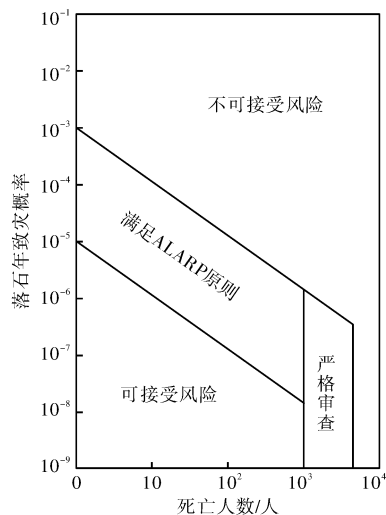


图 1 生命风险标准

3.2 经济风险

经济风险是指落石灾害致灾损失估测的不确定性。首先设定经济风险级别(表5)。经济风险级别的设定是一个动态设置,不是绝对唯一的,主要根据不同时期地区发展水平,灵活确定经济风险标准。然后根据已计算出的落石致灾概率和经济损失,比照图2,即可判定经济损失程度是否超出预设风险水平。

表5 经济损失程度分级

等级	一	二	三	四	五
数额/万元	< 30	30 ~ 60	60 ~ 120	120 ~ 600	> 600

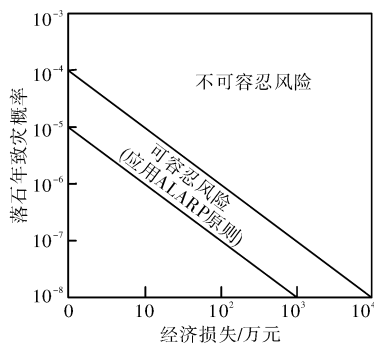


图2 经济风险标准图^[15]

4 评价方法应用

菜地沟危岩带位于重庆万州龙宝区万二村,区域内常住人口500余人,另有两家乡镇企业、一所小学。受菜地沟主危岩段威胁对象主要是:达万铁路菜地沟特大桥、西环线和大居民。

首先以该段内倾倒式危岩W77为例计算危岩崩落概率。按文献[8]稳定系数法计算得 $F_s = 1.12$,处于欠稳定状态,按文献[9]危险度法计算,得 $f = 61.791$,考虑到坡底在建公路,提高危险等级,所以崩落概率取为0.9。两者结果相符合。

然后计算落石到达威胁区域概率,W77危岩处坡高约53 m;平均坡度约31°;整体坡形为直线形、上凹下凸形,坡表起伏大多小于0.1 m;坡表面为少量坡积物,有块石堆,植被稀少以草为主;W77危岩呈块状,大小约4 m³;危岩下方修建公路,有切坡。可知评分结果如下:IP1 = 9,IP2 = 1,IP3 = 27,IP4 = 9,IP5 = 9,IP6 = 27,IP7 = 27,则

$$IP = \frac{\sum_{i=1}^n IP_i}{n} = \frac{9 + 1 + 27 + 9 + 9 + 27 + 27}{7} = 15.57. \quad (12)$$

依据表2可得落石到达威胁区域概率为0.705。

落石击中承灾体概率,区域内受威胁最大的为菜地沟特大桥,且桥长完全在威胁范围内,即只要落石能运动至该区域,则必定击中桥梁,故对菜地

沟大桥其致灾概率为:0.9 × 0.705 = 0.634 5。人员损失为落石击中途径大桥客运列车上人员,因此可计算落石击中火车的概率。菜地沟大桥与W77危岩预测滚落方向相交,桥总长为192 m,受威胁长度 $L_q = 150$ m,列车长度以 $L_c = 260$ m计,列车通行次数为8次,列车车速80 km/h,由以上假定可计算出落石击中火车的概率为:

$$P_h = \frac{8 \times \frac{L_q + L_c}{v}}{24 \times 60 \times 60} = 8 \times$$

$$(150 + 260)/(80/3.6)/(8.64 \times 10^4) = 0.001 7. \quad (13)$$

因此,综合危岩崩落概率0.9,落石到达威胁区概率0.705和落石击中承灾体概率0.001 7,故火车被落石击中的概率为:

$$P = 0.9 \times 0.705 \times 1.7 \times 10^{-3} = 1.08 \times 10^{-3}. \quad (14)$$

根据表3可知潜在死亡人数为3人。经济损失主要包括击毁火车、铁路桥等其他间接损失,考虑其修复与重建费用,经济损失约200万元。

将人员死亡概率与潜在死亡人数代入图1,为不可接受风险;将落石致灾概率与经济损失代入图2,也为不可接受风险。

5 结论

(1)建立对落石灾害危险性的概率评价方法,用致灾概率表示落石致灾可能性,用致灾后果来表示致灾严重性,覆盖了落石灾害的全过程。

(2)将落石致灾概率按致灾过程从危岩崩落概率、落石到达威胁区域概率、落石击中承灾体概率三个方面进行评价。量化了评价因素,减少了人为主观因素的干扰,使得灾害评价结果更具有客观性。

(3)落石击中承灾体概率可通过代表性的承灾体概率公式获得;当承灾体不在本文建议的承灾体概率计算公式之列时,可参考相近公式或根据类似情况进行合理推导与变换,得到符合实际的概率计算公式。

(4)通过分析承灾体的易损性,将落石灾害后果分为人员损失和经济损失两部分,进行评价,并提出了落石灾害风险可接受水平,给出了经济与生命风险建议值,为落石灾害的防治提供了决策依据。

(5)将落石灾害评价的定性、定量描述向概率形式转换,两者最终都可以转化为概率表达。这表明概率评价方法比较符合落石灾害特点的实际情况,并为后续设定统一可靠的落石灾害评价标准作基础。

参考文献:

- [1] Pritchard M, Porter M, Savigny W, et al. CN rockfall hazard

- risk management system: Experience, enhancements, and future direction [C]//Landslide Risk Management: Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver: University of Michigan, 2005.
- [2] Federal Highway Administration of USA. Rockfall Hazard Rating System: Participant's Manual [M]. FHWA SA - 93 - 057, 1993.
- [3] 胡厚田, 陈彪. 崩塌落石区段预测的研究[J]. 铁道学报, 1996, 18(4): 95 - 99.
- [4] 胡厚田. 崩塌落石综合预测方法的研究[J]. 铁道工程学报, 1996, (2): 182 - 190.
- [5] 张路清, 杨志法. 公路沿线遭遇滚石的风险分析案例研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3700 - 3708.
- [6] 张路青, 杨志发, 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 (Supp. 2): 5543 - 5548.
- [7] 郑黎明. 宝成线略广段崩塌落石灾害发展速度的预测[J]. 水文地质工程地质, 1994(1): 13 - 15.
- [8] 陈洪凯, 唐红梅, 王蓉. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 614 - 619.
- [9] 叶四桥, 唐红梅, 祝辉. 基于 AHP-Fuzzy 方法的危岩危险度评价[J]. 武汉理工大学学报: 交通版, 2006, 10, 30(5): 800 - 803.
- [10] 叶四桥. 隧道洞口段落石灾害研究与防治[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [11] 杨威. 危岩落石灾害危险性评价及防治决策方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [12] 张奇华, 彭光忠, 付少兰等. 链子崖危岩体变形破坏系统辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 544 - 551.
- [13] Jordi Corominas, Ramon Copons, Jos'e Moya, et al. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area [J] Landslides, 2005, (2): 343 - 357.
- [14] ERM-Hong Kong. Landslides and boulder falls from natural terrain: Interim risk guidelines [R]. Hong Kong: Geotechnical Engineering Office, 1998: 1 - 15.
- [15] ANCOLD. Guideline on risk assessment. [C]//Tatura: Australian National Committee on Large Dams. 2003: 24 - 30.

Evaluation Method for Probability of Rockfall Hazard

Gong Shangqing¹, Ye Siquiao^{1, 2} and Yang Wei³

- (1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Postdoctoral Workstation of Chongqing Bureau of Geology and Minerals Exploration, Chongqing 401121, China;
3. Jiangsu Transportation Institute, Nanjing 210017, China)

Abstract: The evaluation of rockfall hazard would be consist of the possibility of rockfall causing hazard and rockfall hazard seriousness, which will be characterized by the probability of rockfall death of human beings, and economic losses. Based on the current research of possibility of the dangerous rock collapsing and the possibility of the rockfall reaching the threatened area, the probability of rockfall will be calculated by rockfall's probability about caving from the slope, reaching the threatened area, hitting on the stricken body. Though probabilistic analysis, it will be a quantitative evaluation method. Combining the risk level study on dam and landslide with the characteristics of rockfall, the method will analyze the vulnerability of stricken body, set the acceptable risk level of rockfall hazard and give the proposal risk level of victims and economic losses. Applied to the rockfall hazard evaluation at Caidigou rockfall point of Wanzhou in Chongqing, the method shows that it can quantify degree of rockfall dangerousness, solve the problem of how to evaluate the rockfall hazard and provide basis for rockfall mitigation.

Key words: rockfall disaster; hazard evaluation; probabilistic analysis; risk level