

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220723001

## 降雨诱发公路滑坡社会风险评估\*

张洁, 庄一豪, 陆盟

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 降雨诱发公路滑坡灾害威胁着行车人员的生命安全, 评估公路滑坡社会风险具有重要意义。然而, 目前的公路滑坡社会风险评估方法无法考虑不同伤亡人数的年发生概率。针对上述不足, 提出公路滑坡两类影响方式下不同伤亡人数的年发生概率计算方法, 两类影响方式分别为运动滑体冲击行进中车辆和运动车辆碰撞已滑落滑体。提出的方法被用于评估香港地区青山公路某滑坡社会风险。首先基于中国香港历史滑坡数据统计获得降雨诱发该滑坡的年发生概率, 之后采用经验公式预测该滑坡可能的滑动距离, 最后基于全概率理论对两类影响方式下不同伤亡人数的年发生概率分别进行计算, 并基于  $F-N$  图对社会风险进行评价。评价结果表明不同类型车辆人员的伤亡风险互不相同, 运动滑体冲击行进中车辆造成的人员伤亡风险低于运动车辆碰撞已滑落滑体造成的人员伤亡风险。

**关键词:** 降雨; 公路滑坡; 车辆; 社会风险; 伤亡人数

**中图分类号:** P642.22; X915.5   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0413-10

## Assessing Societal Risk of Rainfall-induced Landslides along Highways

ZHANG Jie, ZHUANG Yihao, LU Meng

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Rainfall-induced landslides pose a significant threat to highway users, making it essential to assess societal risk associated with landslides along highways. However, current methods for assessing societal risk of highway landslides cannot address the annual occurrence probability of different numbers of fatalities. In view of the above limitation, this study presents a method to calculate the annual occurrence probability of different numbers of fatalities resulting from two types of highway landslide impacts. These two types of impacts are, respectively, moving vehicles hit by landslides and moving vehicles hitting sliding masses. The proposed method was used to assess the societal risk associated with a landslide along Castle Peak Road in Hong Kong. First, the annual failure probability of the slope under rainfall was obtained based on historical landslide data. Then, the potential runout distances of the landslide are predicted using an empirical model. Finally, the total probability theorem was used to compute the annual occurrence probabilities of different numbers of fatalities resulting from the two types of landslide impacts, respectively, which are also evaluated using the  $F-N$  diagram. The results show that the societal risks for different types of vehicles are not the same, and the societal risk is lower when moving vehicles are hit by the landslide than when moving vehicles hit the sliding mass. The conclusions can provide references for the prevention and management of highway landslides in China.

**Keywords:** rainfall; highway landslides; vehicles; societal risk; number of fatalities

\* 收稿日期: 2022-07-23; 修回日期: 2022-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072302)资助

作者简介: 张洁(1980—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事滑坡灾害风险方面的研究。E-mail: cezhangjie@tongji.edu.cn

通讯作者: 陆盟(1998—), 男, 博士研究生。主要从事滑坡灾害风险方面的研究。E-mail: lumeng@tongji.edu.cn

## 0 引言

我国幅员辽阔,地形地貌复杂,大量公路在滑坡灾害的威胁下运营<sup>[1-3]</sup>,公路滑坡灾害导致行车人员伤亡事件时有发生<sup>[4-7]</sup>。降雨是诱发滑坡灾害最主要的因素之一。准确评估降雨诱发公路滑坡灾害下的人员伤亡风险对保障交通安全具有重要意义。公路滑坡对行车安全的影响方式主要可分为两类:(1)运动滑体冲击行进中车辆;(2)运动车辆碰撞已滑落滑体<sup>[8]</sup>。公路滑坡对行车人员的危害程度可采用滑坡社会风险进行分析,通常基于伤亡人数的年发生概率进行量化计算<sup>[9-12]</sup>。公路滑坡灾害下的人员伤亡风险受到许多不确定性因素的影响,如边坡失稳事件的不确定性、滑体空间影响范围的不确定性、车辆时空分布的不确定性等。由于大量不确定性因素的存在,公路滑坡灾害的社会风险极难评价。目前,不少学者对公路滑坡两类影响方式下伤亡人数大于1的年发生概率进行了分析<sup>[13-14]</sup>,为评估公路滑坡灾害的社会风险提供了参考。不过,上述分析无法获得不同伤亡人数的年发生概率,故不能进行严格的滑坡社会风险评估。

针对上述不足,本文旨在提出降雨诱发公路滑坡两类影响方式下不同伤亡人数的年发生概率计算方法,为降雨诱发公路滑坡的社会风险评估提供实用工具。

## 1 降雨诱发公路滑坡社会风险评估模型

依据滑坡社会风险评估理论<sup>[12]</sup>,本文将影响降雨诱发公路滑坡造成的伤亡人数的因素划分为滑坡发生概率、滑坡影响范围以及影响范围内不同类型车辆人员的分布数量。令 $P(F)$ 表示滑坡的年发生概率,该值可通过经验法<sup>[15-16]</sup>或力学法<sup>[17-18]</sup>进行求解,其中经验法是基于历史滑坡数据统计进行分析,力学法是通过复杂的数值建模,同时考虑降雨和土体参数的不确定性,采用可靠度方法进行分析。由于地形地貌存在不确定性,滑坡发生后滑体的影响范围也是不确定的。令 $P(S = S_i|F)$ 表示滑坡第 $i$ 种影响范围的发生概率,该值也可通过解析、

数值方法<sup>[19-21]</sup>或经验公式<sup>[22-23]</sup>进行求解,其中解析、数值方法是基于力学运动方程建立的,经验公式是基于历史滑坡影响范围统计建立的。令 $n_{pj}$ 表示滑坡影响范围内第 $j$ 类车辆人员的分布数量。相比以上两种因素,如何考虑 $n_{pj}$ 的不确定性仍缺乏研究<sup>[7,14]</sup>。本文重点考虑 $n_{pj}$ 的不确定性,该值直接决定了滑坡可能造成的伤亡人数。令 $P(n_{pj} = k|S = S_i)$ 表示滑坡第 $i$ 种影响范围发生条件下第 $j$ 类车 $k$ 个人人员伤亡的发生概率。基于全概率公式,降雨诱发公路滑坡导致 $j$ 类车 $k$ 个人人员伤亡的年发生概率可由下式计算得到:

$$P(n_{pj} = k) = P(F) \sum_{i=1}^m [P(S = S_i|F) P(n_{pj} = k|S = S_i)] \quad (1)$$

式中, $m$ 表示滑坡发生后所有可能的影响范围。令 $n$ 表示某区域车辆类型的总数,考虑所有类型车辆时降雨诱发公路滑坡导致 $k$ 个人人员伤亡的年发生概率可由下式求得:

$$P(n_p = k) = P(F) \sum_{i=1}^m \left[ P(S = S_i|F) P\left(\sum_{j=1}^n n_{pj} = k|S = S_i\right) \right] \quad (2)$$

式(1)、(2)给出了降雨诱发公路滑坡灾害导致公路车辆不同伤亡人数的年发生概率求解模型,本文采用该值对降雨诱发公路滑坡灾害的社会风险进行衡量。如上所述,目前对 $P(n_{pj} = k|S = S_i)$ 的研究较少,下文将提出对公路滑坡两类影响方式下的不同伤亡人数的概率分析方法。

## 2 运动滑体冲击行进中车辆人员伤亡概率分析

### 2.1 滑坡影响范围

通常,滑坡影响范围包括滑体对公路横向和沿公路行车方向两个维度的影响。图1给出了公路滑坡横断面示意图,其中 $H$ 为边坡高度, $D$ 为滑坡的滑动距离,定义为滑体后缘与前缘的水平距离。由图可知,公路横向受影响范围与滑坡的滑动距离密切相关。若滑体未到达路面,则公路上车辆不受滑坡影响;若滑体到达路面,则公路受影响程度取决于滑体对路面的覆盖程度。本文采用影响系数 $\alpha(D)$ 表征滑坡滑动距离对公路的影响,其定义为:

$$\alpha(D) = \begin{cases} 0 & , D \leq D_0 \\ \frac{D - D_0}{W_h} & , D_0 < D < D_0 + W_h \\ 1 & , D_0 + W_h \leq D \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $D_0$  为滑体后缘与路肩边线的水平距离;  $W_h$  为公路宽度。基于式(3), 0~1 反映了公路横向的受影响程度, 受影响程度越大, 值越趋近于 1。

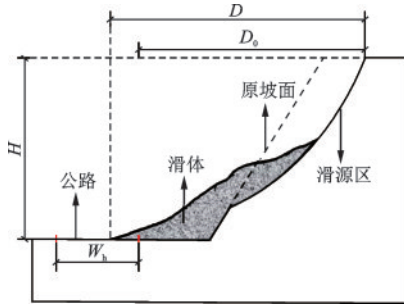


图1 公路滑坡横断面

Fig.1 Cross section of a landslide along a highway

图2展示了运动滑体冲击行进中车辆的俯视图, 其中  $L_j$  为第  $j$  类车的长度,  $W_l$  为滑体宽度。由该图可知, 滑体对公路沿行车方向的影响范围与滑体宽度以及车辆长度有关<sup>[7-8, 13]</sup>。令  $L_{aj}^1$  表示滑坡沿行车方向的影响范围, 本文采用下式对其进行计算:

$$L_{aj}^1 = W_l + 2L_j \quad (4)$$

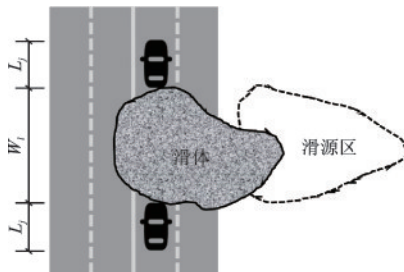


图2 运动滑体冲击行进中车辆俯视图

Fig.2 Plan view of moving vehicles hit by a landslide

## 2.2 人员伤亡概率

公路上车辆的分布通常具有显著的时空不确定性。给定滑坡影响范围条件下, 公路上的人员伤亡情况由滑坡影响范围内的车辆分布情况决定。因此, 本文提出基于公路车辆的不确定性分布对滑坡条件下人员的伤亡概率进行分析。交通学领域中, 公路上正常行进车辆的时空不确定性可用泊松

过程进行模拟<sup>[24]</sup>。令  $\lambda$  表示车辆的平均出现速率(或车流密度), 其可基于下式计算<sup>[25]</sup>:

$$\lambda = \frac{q}{v} \quad (5)$$

式中,  $q$  为公路上的总车流量;  $v$  为车辆平均行驶速度。令  $w_j$  表示第  $j$  类车在总车流量中所占的比例, 则第  $j$  类车的平均出现速率  $\lambda_j$  可以表示为:

$$\lambda_j = w_j \times \frac{q}{v} \quad (6)$$

当车辆的出现服从泊松过程时, 车辆人员的出现也服从泊松过程<sup>[14]</sup>。令  $j$  类车的载客量为  $N_{pj}$ , 则  $j$  类车人员的平均出现速率为  $\lambda_{pj} = N_{pj} \times \lambda_j$ , 其含义为单位范围内第  $j$  类车人员的平均出现数量。基于上节分析, 滑坡的影响范围可通过公式(3)和公式(4)进行表征。令  $S = S_i = \{\alpha(D = D_i), L_{aji}^1\}$  表示滑坡一种可能的影响范围, 在该种滑坡影响范围内车辆人员的平均出现数量可表示为  $\alpha(D = D_i) \times L_{aji}^1 \times \lambda_{pj}$ 。最终, 第  $j$  类车  $k$  个人人员伤亡的发生概率  $P(n_{pj} = k | S = S_i)$ , 可基于泊松分布公式求得:

$$P(n_{pj} = k | S = S_i) = \frac{[\alpha(D = D_i) L_{aji}^1 \lambda_{pj}]^k}{k!} \exp[-\alpha(D = D_i) L_{aji}^1 \lambda_{pj}] \quad (7)$$

公路上车辆的分布一般会随时间发生变化, 因此一天不同时段内车辆人员的平均出现速率也互不相同。假设一天被分为  $t$  个时段, 令  $T_z$  表示一天内的第  $z$  个时段。令  $P(T \in T_z)$  表示滑坡在时段  $T_z$  的发生概率。当滑坡影响范围是  $S = S_i$  时, 第  $j$  类车  $k$  个人人员伤亡的发生概率可基于全概率公式计算得到:

$$P(n_{pj} = k | S = S_i) = \sum_{z=1}^t P(n_{pj} = k | S = S_i, T \in T_z) P(T \in T_z) \quad (8)$$

公式(7)和(8)给出了已知滑坡影响范围情况下第  $j$  类车不同伤亡人数发生概率的计算方式。文献[26]指出若干泊松分布的累加和仍服从泊松分布, 因此考虑  $n$  种不同类型的车辆后, 公路行车人员的分布仍服从泊松分布。基于  $n$  种类型车辆的载客数, 所有车辆人员的平均出现速率可表示为  $\lambda_p = \lambda(w_1 N_{p1} + w_2 N_{p2} + \dots + w_n N_{pn})$ 。由公式(4)可知, 滑坡沿行车方向的影响范围受车长影响, 考虑  $n$  种类型车辆时滑坡沿行车方向的平均影响范围可表示为  $L_a^1 = W_l + 2(w_1 L_1 + w_2 L_2 + \dots + w_n L_n)$ 。同理, 对于  $n$  种类型车辆  $k$  个人人员伤亡的发生概率仍可

基于泊松分布公式求得：

$$P\left(\sum_{j=1}^n n_{pj} = k | S = S_i\right) = \frac{[\alpha(D = D_i)L_{ai}^1 \lambda_p]^k}{k!} \exp[-\alpha(D = D_i)L_{ai}^1 \lambda_p] \quad (9)$$

同样，考虑滑坡发生时间的不确定性，给定滑坡影响范围条件下对于所有类型车辆  $k$  个人人员伤亡的发生概率可表示为：

$$P\left(\sum_{j=1}^n n_{pj} = k | S = S_i\right) = \sum_{z=1}^t P\left(\sum_{j=1}^n n_{pj} = k | S = S_i, T \in T_z\right) P(T \in T_z) \quad (10)$$

### 3 运动车辆碰撞已滑落滑体人员伤亡概率分析

#### 3.1 滑坡影响范围

对于运动车辆碰撞已滑落滑体，滑坡对公路横向的影响范围仍可采用公式(3)表征；滑坡对公路沿行车方向的影响一般与车辆发现滑坡后的紧急制动距离密切相关<sup>[7-8, 13]</sup>。图3展示了运动车辆碰撞已滑落滑体俯视图。由该图可知，若车辆与已滑落滑体之间的距离大于制动距离，则司机可以及时刹车，避免碰撞事故的发生；若车辆与已滑落滑体之间的距离小于制动距离，则会发生碰撞。因此，对于运动车辆碰撞已滑落滑体，本文采用下式计算滑坡对公路沿行车方向的影响：

$$L_{aj}^n = D_b + L_j \quad (11)$$

式中， $L_{aj}^n$ 为对于第  $j$  类车辆，滑坡沿行车方向的影响范围。

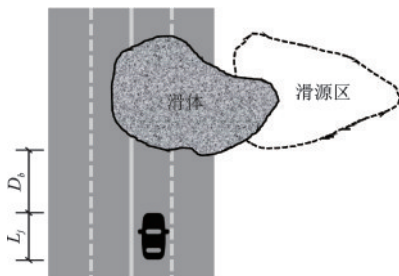


图3 运动车辆碰撞已滑落滑体俯视图

Fig.3 Plan view of moving vehicles hitting a sliding mass  
注： $D_b$ 表示车辆发现滑坡后的紧急制动距离； $L_j$ 为第  $j$  类车辆车长

本文采用文献[27]建议的公式对车辆制动距离  $D_b$  进行估算：

$$D_b = t_p \times v + \alpha \times v^2 \quad (12)$$

式中， $v$ 为车辆行驶速度； $t_p$ 为司机反应时间； $\alpha$ 为车辆制动系数，其取值与路面情况以及车辆制动性能有关，路面越粗糙，制动性能越好， $\alpha$ 取值越小。

#### 3.2 人员伤亡概率

运动车辆碰撞已滑落滑体时，滑坡条件下人员的伤亡概率仍可基于滑坡影响范围内车辆的不确定性分布进行分析。基于公式(6)可求得第  $j$  类车辆人员的平均出现速率  $\lambda_{pj}$ 。基于公式(3)、(11)和(12)可求得滑坡影响范围。对于某种滑坡影响范围  $S = S_i = \{\alpha(D = D_i), L_{aj}^n\}$ ，第  $j$  类车  $k$  个人人员伤亡的发生概率同样可基于泊松分布公式求得：

$$P(n_{pj} = k | S = S_i) = \frac{[\alpha(D = D_i)L_{aj}^n \lambda_{pj}]^k}{k!} \exp[-\alpha(D = D_i)L_{aj}^n \lambda_{pj}] \quad (13)$$

考虑滑坡发生时间的不确定性，给定滑坡影响范围条件下第  $j$  类车  $k$  个人人员伤亡的发生概率仍可基于全概率公式求得，如公式(8)所示。考虑  $n$  种不同类型的车辆，公路行车人员的平均出现速率可表示为  $\lambda_p = \lambda(\omega_1 N_{p1} + \omega_2 N_{p2} + \dots + \omega_n N_{pn})$ ；依据公式(11)，滑坡沿行车方向的平均影响范围可表示为  $L_a^n = D_b + (\omega_1 L_1 + \omega_2 L_2 + \dots + \omega_n L_n)$ 。基于泊松分布公式，对于所有类型车辆  $k$  个人的伤亡概率为：

$$P\left(\sum_{j=1}^n n_{pj} = k | S = S_i, T \in T_z\right) = \frac{[\alpha(D = D_i)L_{ai}^n \lambda_p]^k}{k!} \exp[-\alpha(D = D_i)L_{ai}^n \lambda_p] \quad (14)$$

### 4 案例研究

中国香港地区是我国滑坡高发地带。以中国香港青山公路青龙头段某边坡为例，图4基于自然资源部标准地图给出了该边坡的地理位置示意<sup>[28]</sup>。青山公路青龙头段为双向四车道，道路宽度  $W_h$  为 21 m。该路段一天内的车辆分布情况可分为三个时段，分别为早高峰 7:00-9:00，晚高峰 17:00-19:00 以及正常时段。早高峰和晚高峰的车流量和车辆

行驶速度分别为1500辆/h和15 km/h;正常时段的车流量和车辆行驶速度分别为460辆/h和60 km/h<sup>[29-30]</sup>。



图4 滑坡案例位置示意

Fig.4 Location of the landslide site

当地车辆类型包括私人巴士、非专营巴士、专营巴士、出租车、私人小汽车、公共小巴、私人小巴、货车、特殊用途车辆、政府车辆及摩托车,共11类。表1分别展示了不同类型车辆占总车流量的比例 $w_j$ 、车长 $L_j$ 以及额定载客数 $N_{pj}$ <sup>[14]</sup>。1994年8月7日,强降雨诱发该边坡发生滑塌,冲击了一辆行进中的公共小巴,造成1人死亡。滑坡发生后,滑坡高度 $H$ 为16.8 m,滑坡宽度 $W_l$ 为20 m,滑体体积 $V$ 约为700 m<sup>3</sup>,滑体后缘与路肩边线的水平距离 $D_0$ 为23 m<sup>[31]</sup>。下文将应用上文提出的方法对降雨诱发该边坡再次失稳时造成的社会风险进行评估。由于实际情况中各类车辆的载客数难以确定,下文中各类车辆的载客数取额定载客数。应该指出,该种情况为车辆人员伤亡的最危险情况。

#### 4.1 降雨诱发滑坡年发生概率评估

如上文分析,降雨诱发滑坡年发生概率一般可基于力学法或经验法评估。由于力学方法需要复杂的数值建模,且需同时考虑降雨和岩土参数的不确定性,目前缺乏实用的分析工具。经验法是基于降雨滑坡的历史数据进行统计分析,计算方便,在实际工程中应用广泛<sup>[32-33]</sup>,因此本案例中采用经验法对降雨诱发该边坡失稳的年发生概率进行估算。文献[34]研究表明,影响中国香港地区的降雨可按日降雨量分为三类:(1)小于200 mm/d的小雨;(2)介于200 mm/d与400 mm/d之间的中雨;(3)大于

表1 不同类型车辆占总车流量比例、车长及额定载客数  
Table 1 Proportions in the traffic flow, vehicle length, and passenger capacity for different types of vehicles

车辆类型	占比/%	长度/m	额定载客数/人
私人巴士	0.08	10	55
非专营巴士	0.82	10	55
专营巴士	0.72	10	55
出租车	2.30	5	5
私人小汽车	71.41	5	5
公共小巴	0.50	9	33
私人小巴	0.39	9	33
货车	13.77	12	2
特殊用途车辆	0.23	5	1
政府车辆	0.74	5	5
摩托车	9.24	2	1

400 mm/d的大雨。令 $P(SR), P(MR), P(LR)$ 分别表示小雨、中雨和大雨的年发生概率。文献[14]统计了中国香港地区1969~2018年的最大日降雨量,通过拟合最大日降雨量的分布情况得到了小雨、中雨和大雨的年发生概率分别为 $P(SR)=0.44, P(MR)=0.55, P(LR)=0.01$ 。令 $P(F|SR), P(F|MR), P(F|LR)$ 分别表示不同降雨条件下边坡的失稳概率。文献[34]通过对中国香港地区历史滑坡数据的统计分析,得到了不同降雨条件下边坡的失稳概率分别为 $P(F|SR) = 1.09 \times 10^{-4}, P(F|MR) = 2.61 \times 10^{-3}, P(F|LR) = 8.94 \times 10^{-3}$ 。综上,中国香港地区降雨诱发滑坡的年发生概率可采用全概率公式求得:

$$P(F) = P(SR)P(F|SR) + P(MR)P(F|MR) + P(LR)P(F|LR) \quad (15)$$

基于公式(15),中国香港地区降雨诱发边坡失稳的平均年发生概率为 $1.57 \times 10^{-3}$ ,本案例采用该值表示降雨诱发青山公路边坡失稳的年发生概率。

#### 4.2 滑坡影响范围发生概率评估

本案例基于滑坡滑动距离的不确定性考虑滑坡影响范围的发生概率。文献中<sup>[22-23]</sup>滑坡滑动距离可基于解析、数值方法或经验公式进行预测。然而,目前基于三维解析、数值模型的滑坡影响范围

分析方法研究尚不成熟,因此本案例采用经验公式对滑体可能的滑动距离进行预测。文献[35]指出,中国香港地区滑坡滑动距离可基于滑坡体积 $V$ ( $m^3$ )和边坡高度 $H$ (m)进行估算:

$$\log D = 0.085 \log V + \log H + 0.047 + \epsilon \quad (16)$$

式中, $\epsilon$ 为预测误差项,服从均值为0标准差为0.161的正态分布。

对于已发生滑坡, $H$ 和 $V$ 可通过实际测量获得;对于未发生失效的边坡, $H$ 和 $V$ 一般可通过边坡稳定性分析估算获得<sup>[36]</sup>。本案例中滑坡已经发生,将 $H = 16.8$  m, $V = 700$   $m^3$ 代入公式(16),可以求得 $\log D$ 服从均值为1.51、标准差为0.161的正态分布。图5展示了滑坡滑动距离 $D$ 的概率密度分布,可以看到该滑坡可能的滑动距离主要位于20~50 m。

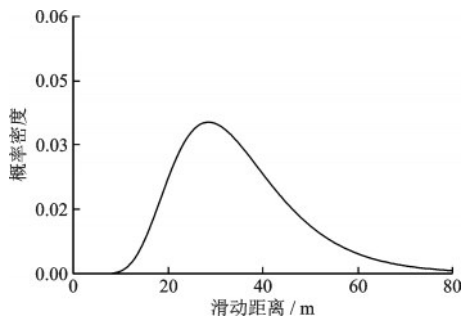


图5 滑坡滑动距离概率分布

Fig.5 Probability distribution of the runout distance of the landslide

### 4.3 运动滑体冲击行进中车辆人员伤亡概率评估

#### 4.3.1 滑坡影响范围计算

将图5中滑坡可能的滑动距离代入公式(3),可以计算得到该滑坡不同滑动距离对公路的影响。对于不同类型车辆的滑坡沿行车方向的影响范围可基于公式(4)计算得到。以私人小汽车为例,私人小汽车车长为5 m,滑坡宽度为20 m,因此沿行车方向的滑坡影响范围为 $20 + 2 \times 5 = 30$  m。当考虑所有类型的车辆时,车辆的平均车长为 $w_1 L_1 + w_2 L_2 + \dots + w_n L_n = 5.83$  m,此时沿行车方向的滑坡影响范围为 $20 + 2 \times 5.83 = 31.66$  m。

#### 4.3.2 人员伤亡概率计算

以私人小汽车为例,基于公式(6)可以求得高峰时刻私人小汽车的平均出现速率为 $71.41\% \times$

$1500/15 \approx 71$  辆/km,私人小汽车的额定载客数为5人/辆,因此私人小汽车人员的平均出现速率为 $71 \times 5 = 355$  人/km。当滑坡滑动距离影响 $\alpha(D) = 1$ 时,滑坡影响范围内私人小汽车人员的平均出现数量为 $30/1000 \times 355 \approx 10$  人。基于公式(7),图6展示了滑坡滑动距离影响 $\alpha(D) = 1$ 时,高峰时刻滑坡冲击行进中私人小汽车导致不同数量人员伤亡的发生概率。由该图可知,人员伤亡概率随伤亡人数的增加先增加后减少,伤亡人数为10人的发生概率最大,约为0.12。

正常时刻私人小汽车的平均出现速率为 $71.41\% \times 460/60 \approx 5$  辆/km,因此私人小汽车人员的平均出现速率为 $5 \times 5 = 25$  人/km。当滑坡滑动距离影响 $\alpha(D) = 1$ 时,滑坡影响范围内私人小汽车人员的平均出现数量为 $30/1000 \times 25 \approx 1$  人。基于公式(7),图7展示了滑坡滑动距离影响 $\alpha(D) = 1$ 时,正常时刻滑坡冲击行进中私人小汽车导致不同数量人员伤亡的发生概率。由图可知,正常时刻和高峰时刻的人员伤亡概率显著不同。当处于正常时刻,私人小汽车的平均伤亡人数不足1人,伤亡概率随伤亡人数的增加逐渐减小。

令 $T_p$ 表示早、晚高峰时段,该时段总长为4 h。令 $T_n$ 表示正常时段,该时段总长为20 h。由于降雨事件的发生具有随机性,一天内不同时段的降雨量难以进行区分统计,且某时段内发生的滑坡事件与该时段的降雨量之间很难具有统计相关性,因此本文假设滑坡发生在一天内任意时刻的概率相同,则滑坡发生在早、晚高峰时段的概率为 $P(T \in T_p) = 4/24 = 0.17$ ,滑坡发生在正常时段的概率为 $P(T \in T_n) = 20/24 = 0.83$ 。基于公式(8),图8展示了考虑滑坡发生时间不确定性的滑坡冲击行进中私人小汽车导致不同数量人员伤亡的发生概率。由该图可知,伤亡概率随伤亡人数的增加逐渐减少,与正常时刻伤亡概率随伤亡人数的变化规律一致,其中伤亡人数为0人的发生概率为0.37。

### 4.4 运动车辆碰撞已滑落滑体人员伤亡概率评估

#### 4.4.1 滑坡影响范围计算

该类情况下滑坡不同滑动距离对公路的影响仍可基于公式(3)和图5求得。对于不同类型车辆的滑坡沿行车方向的影响范围可基于公式(11)计算得到。以私人小汽车为例,高峰时刻车辆的行驶

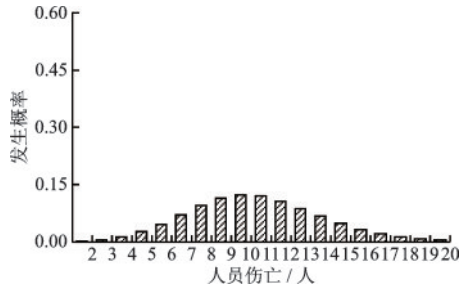


图6  $\alpha(D) = 1$ 条件下高峰时刻运动滑体冲击行进中私人小汽车的人员伤亡概率

Fig.6 Probability of fatality occurrence during peak periods when moving private cars are hit by the landslide and when  $\alpha(D) = 1$

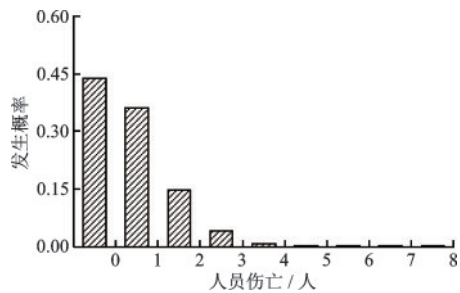


图7  $\alpha(D) = 1$ 条件下正常时刻运动滑体冲击行进中私人小汽车的人员伤亡概率

Fig.7 Probability of fatality occurrence during normal periods when moving private cars are hit by the landslide and when  $\alpha(D) = 1$

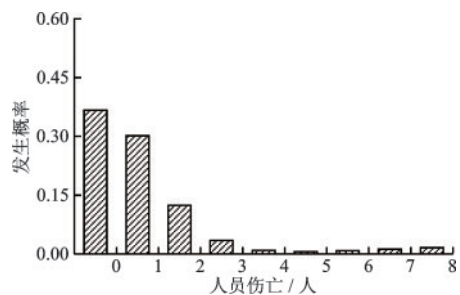


图8  $\alpha(D) = 1$ 条件下考虑滑坡发生时间不确定性的运动滑体冲击行进中私人小汽车的人员伤亡概率

Fig.8 Probability of fatality occurrence considering the uncertainty of the failure time of the slope when moving private cars are hit by the landslide and when  $\alpha(D) = 1$

速度为 15 km/h,司机反应时间和车辆制动系数分别取 1 s 和 0.01 m/kph<sup>[27]</sup>,基于公式(12)可求得高峰时刻私人小汽车的制动距离为  $15/3.6 \times 1 + 0.01 \times 15^2 = 6.4$  m,基于公式(11)滑坡沿行车方向影响范围为  $6.4 + 5 = 11.4$  m。正常时刻车辆的行驶速度为 60 km/h,司机反应时间和车辆制动系数

仍取 1 s 和 0.01 m/kph<sup>2</sup>,此时私人小汽车的制动距离为  $60/3.6 \times 1 + 0.01 \times 60^2 = 52.7$  m,滑坡沿行车方向影响范围为  $52.7 + 5 = 57.7$  m。当考虑所有类型的车辆时,车辆的平均车长为 5.83 m,此时高峰时刻沿行车方向的滑坡影响范围为  $6.4 + 5.83 = 12.23$  m,正常时刻沿行车方向的滑坡影响范围为  $52.7 + 5.83 = 58.53$  m。

#### 4.4.2 人员伤亡概率计算

以私人小汽车为例,高峰时刻私人小汽车的平均出现速率约为 71 辆/km,私人小汽车人员的平均出现速率为 355 人/km。当滑坡滑动距离影响  $\alpha(D) = 1$  时,滑坡影响范围内小汽车人员的平均出现数量为  $11.4/1\ 000 \times 355 \approx 4$  人。基于公式(13),图9展示了  $\alpha(D) = 1$  时高峰时刻私人小汽车碰撞已滑落滑体导致不同数量人员伤亡的发生概率。由图可知,小汽车人员的伤亡概率随伤亡人数的增加先增加后减少,其中 4 位人员伤亡的可能性最大,为 0.20。

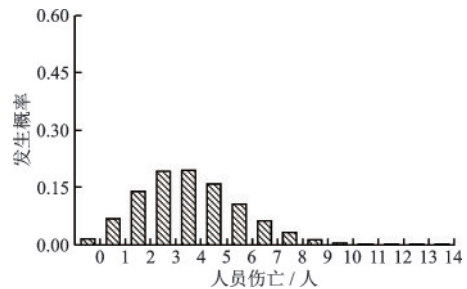


图9  $\alpha(D) = 1$ 条件下高峰时刻运动私人小汽车碰撞已滑落滑体的人员伤亡概率

Fig.9 Probability of fatality occurrence during peak periods when moving private cars hit the sliding mass and when  $\alpha(D) = 1$

正常时刻私人小汽车的平均出现速率约为 5 辆/km,私人小汽车人员的平均出现速率为 25 人/km。当滑坡滑动距离影响  $\alpha(D) = 1$  时,滑坡影响范围内小汽车人员的平均出现数量为  $1 \times 57.7/1\ 000 \times 25 \approx 1$  人。

基于公式(13),图10展示了  $\alpha(D) = 1$  时正常时刻私人小汽车碰撞已滑落滑体导致不同数量人员伤亡的发生概率。由图可知,小汽车人员的伤亡概率同样随伤亡人数的增加先增加后减少,其中 1 位人员伤亡的可能性最大,为 0.33。基于公式(8),图11展示了考虑滑坡发生时间不确定性的运动私

人小汽车碰撞已滑落滑体的人员伤亡概率。由该图可知,伤亡人数为1的发生概率仍是最高,为0.28。

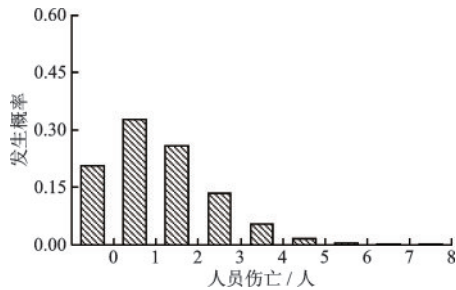


图10  $\alpha(D) = 1$ 条件下正常时刻运动私人小汽车碰撞已滑落滑体的人员伤亡概率

Fig.10 Probability of fatality occurrence during normal periods when moving private cars hit the sliding mass and when  $\alpha(D) = 1$

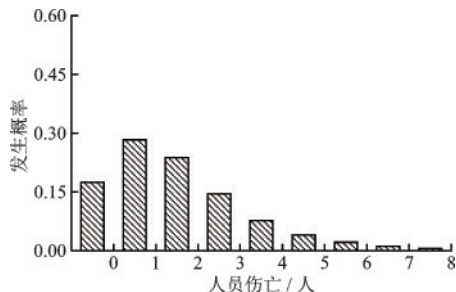


图11  $\alpha(D) = 1$ 条件下考虑滑坡发生时间不确定性的运动私人小汽车碰撞已滑落滑体的人员伤亡概率

Fig.11 Probability of fatality occurrence considering the uncertainty of the failure time of the slope when moving private cars hit the sliding mass and when  $\alpha(D) = 1$

#### 4.5 滑坡社会风险评价

将上文得到的滑坡年发生概率、滑坡影响范围发生概率以及人员伤亡概率分别代入公式(1)和公式(2),可以求得不同类型车辆以及考虑所有类型车辆不同伤亡人数的年发生概率。为评价该滑坡社会风险,本文绘制了伤亡人数( $N$ )与大于等于该伤亡人数的年发生概率( $F$ )的曲线关系图,即  $F-N$  图<sup>[9]</sup>,并采用中国香港岩土工程办事处1998年提出的评价标准<sup>[37]</sup>。 $F-N$ 图一般包括4部分评价区域,分别为广泛接受区、最低合理可行区、不可忍受区和严格审查区。

图12基于  $F-N$ 图评价了考虑滑坡发生时间不确定性的运动滑体冲击行进中车辆造成的人员伤

亡风险。由该图可知,对于不同类型车辆,滑坡造成人员伤亡的年发生概率随伤亡人数的增加逐渐降低。所有类型车辆中,滑坡造成私人小汽车人员的伤亡风险最高,主要由于私人小汽车在总车流量中的占比最高。该滑坡造成私人小汽车至少1名人员伤亡的年发生概率为  $7.83 \times 10^{-4}$ 。特殊用途车辆由于占总车流量的比例以及载客数最低,其人员伤亡风险位于广泛接受区。当考虑所有类型车辆时,伤亡人数至少为1的年发生概率为  $1.04 \times 10^{-3}$ ,超过可忍受临界线,位于不可忍受区。

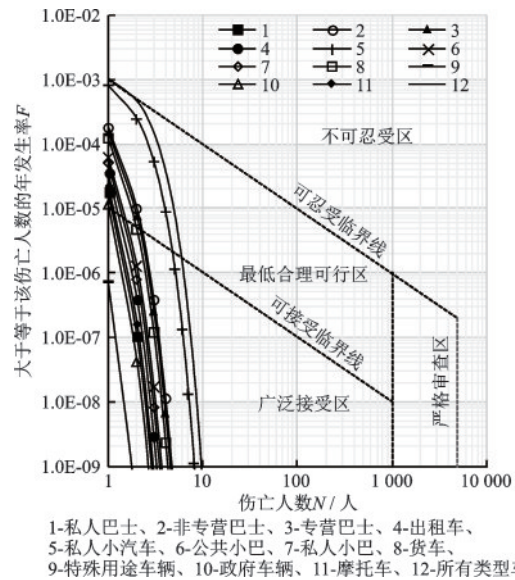


图12  $F-N$  diagram when moving vehicles are hit by the landslide

图13基于  $F-N$ 图评价了考虑滑坡发生时间不确定性的运动车辆碰撞已滑落滑体的人员伤亡风险。由该图可知,滑坡造成私人小汽车人员的伤亡风险仍是最高,至少1名人员伤亡的年发生概率为  $9.70 \times 10^{-4}$ 。除特殊用途车辆,其他类型车辆的人员伤亡风险均位于最低合理可行区。当考虑所有类型车辆时,人员伤亡风险达到了不可忍受区,至少1名人员伤亡的年发生概率为  $1.20 \times 10^{-3}$ 。比较图12和图13可以看到,运动车辆碰撞已滑落滑体造成的人员伤亡风险略高于运动滑体冲击行进中车辆,主要是由于正常时刻运动车辆碰撞已滑落滑体的滑坡沿行车方向影响范围大于运动滑体冲击行进中车辆的滑坡沿行车方向影响范围,且滑坡在正常时刻的发生概率更高。

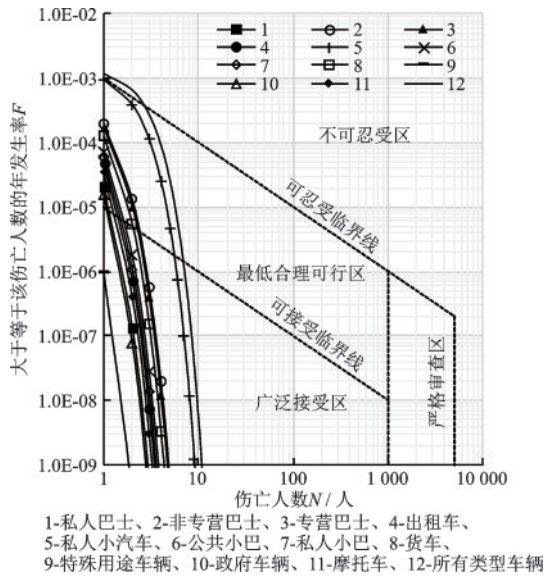


图 13 运动车辆碰撞已滑落滑体  $F-N$  图  
 Fig.13  $F-N$  diagram when moving vehicles hit the sliding mass

## 5 结 论

(1) 提出了运动滑体冲击行进中车辆以及运动车辆碰撞已滑落滑体两类影响方式下不同伤亡人数的概率分析方法,该方法可以计算滑坡导致不同类型车辆的人员伤亡风险。

(2) 基于中国香港地区某公路滑坡案例,采用提出的方法展示了完整的公路滑坡社会风险评估过程。评估结果表明滑坡导致不同类型车辆的人员伤亡风险互不相同,不同类型车辆的人员伤亡风险随伤亡人数的增加逐渐减小。由于私人小汽车占总车辆数的比例最高,其人员伤亡风险在车辆满载条件下最高。

(3) 运动滑体冲击行进中车辆的影响范围小于运动车辆碰撞已滑落滑体的影响范围,前者造成的人员伤亡风险低于后者。基于  $F-N$  图评价可知,当考虑所有类型车辆时,两类影响方式下滑坡造成的人员伤亡风险均位于不可忍受区。

## 参考文献:

[1] 郭永建,谢永利,牛富生. 公路岩质边坡应力监测离心模型试验与应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013,41(11):1697-1701,1743.

Guo Y J, Xie Y L, Niu F S. Centrifugal model test research and application on stress monitoring for highway rock slope [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41 (11) : 1697-1701, 1743. (in Chinese)

[2] 汪军辉,丁晨,陈进举. 某山区公路滑坡分析及治理策略分析[J]. 公路工程,2021,46(1):248-253.  
 Wang J H, Ding C, Chen J J. Analysis on landslide control strategy of a mountain highway [J]. Highway Engineering, 2021, 46(1) : 248-253. (in Chinese)

[3] 姚杰,李秀珍,徐瑞池. 降雨条件下拟建川藏铁路典型段潜在滑坡三维稳定性动态识别研究[J]. 防灾减灾工程学报,2021,41(3):422-431.  
 Yao J, Li X Z, Xu R C. Dynamic identification of three-dimensional stability of potential landslides in a typical section of the proposed Sichuan-Tibet railway under rainfall conditions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41 (3) : 422-431. (in Chinese)

[4] 张亚芳,刘浩. 香港滑坡/泥石流灾害及其治理系统[J]. 广州大学学报(自然科学版),2006,5(1): 45-48.  
 Zhang Y F, Liu H. Landslide and its preventive/mitigation system in Hong Kong [J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science), 2006, 5(1) : 45-48. (in Chinese)

[5] 中国政府网. 中尼公路“7·25”特大山体滑坡地段全面恢复通车[EB/OL]. [2008-8-25]. [http://www.gov.cn/jrzq/2008-08/25/content\\_1078668.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2008-08/25/content_1078668.htm).

[6] 央视网. 降雨持续! 山西2处高速公路发生山体滑坡 部分路段临时封闭[EB/OL]. [2021-10-05]. <https://news.cctv.com/2021/10/05/ARTIwJugm-TOE6ycBqckR3gk8211005.shtml>.

[7] Ferlisi S, Cascini L, Corominas J, et al. Rockfall risk assessment to persons travelling in vehicles along a road: the case study of the Amalfi coastal road (southern Italy)[J]. Natural Hazards, 2012, 62(2) : 691-721.

[8] Macciotta R, Gräpel C, Keegan T, et al. Quantitative risk assessment of rock slope instabilities that threaten a highway near Canmore, Alberta, Canada: managing risk calculation uncertainty in practice [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57(3) : 337-353.

[9] Cascini L, Ferlisi S, Vitolo E. Individual and societal risk owing to landslides in the Campania region (southern Italy) [J]. Georisk Assessment & Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards, 2008, 2

- (3): 125-140.
- [10] 金江凯,杨家其,陈思远. 中国道路交通事故风险可接受准则研究[J]. 公路与汽运, 2019(3):44-46,51.  
Jin J K, Yang J Q, Chen S Y. Research on acceptable criteria of road traffic accident risks in China[J]. Highways and Automotive Applications, 2019(3): 44-46, 51. (in Chinese)
- [11] Jonkman S N, Van Gelder P, Vrijling J K. An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage[J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 99(1): 1-30.
- [12] 唐亚明,张茂省,薛强. 陕西延安市虎头崩滑坡社会风险评价[J]. 地质通报, 2008, 162(11):1782-1786.  
Tang Y M, Zhang M X, Xue Q. Societal risk assessment of Hutoumao landslide in Yan'an City, Shaanxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 162(11): 1782-1786. (in Chinese)
- [13] Nicolet P, Jaboyedoff M, Cloutier C, et al. Brief communication: On direct impact probability of landslides on vehicles[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 2015, 3(12): 7311-7332.
- [14] Lu M, Zhang J, Zhang L, et al. Assessing the annual risk of vehicles being hit by a rainfall-induced landslide: a case study on Kennedy Road in Wan Chai, Hong Kong[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, 20(6): 1833-1846.
- [15] 陆盟,张洁,文思成. 地震作用下滑坡水平运动距离概率预测模型[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(1): 92-99.  
Lu M, Zhang J, Wen S C. Probabilistic model for prediction of seismic landslide travel distance[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(1): 92-99. (in Chinese)
- [16] 刘云,康卉君. 江西崩塌滑坡泥石流灾害空间时间分布特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4):107-112.  
Liu Y, Kang H J. Spatial-temporal distribution of landslide, rockfall and debris flow hazards in Jiangxi Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 107-112. (in Chinese)
- [17] Huang J S, Griffiths D V, Fenton G A. System reliability of slopes by RFEM [J]. Soils and Foundations, 2010, 50(3): 343-353.
- [18] 马陆江,盛建龙. 降雨入渗作用下排土场边坡稳定性分析及可靠度研究[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(6): 67-71.  
Ma L J, Sheng J L. Stability analysis and reliability study of dump slope under rainfall infiltration[J]. Industrial Minerals and Processing, 2019, 48(6): 67-71. (in Chinese)
- [19] 邢爱国,殷跃平. 云南头寨滑坡全程流体动力学机理分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(4): 481-485.  
Xing A G, Yin Y P. Whole course analysis on hydrokinetics mechanism of touzhai gully landslide [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(4): 481-485. (in Chinese)
- [20] 穆鹏,董兰凤,吴玮江. 兰州市九州石峡口滑坡形成机制与稳定性分析[J]. 西北地震学报, 2008, 30(4): 332-336.  
Mu P, Dong L F, Wu W J. Forming mechanism and stability analysis of Shixiakou landslide at Jiuzhou, Lanzhou[J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(4): 332-336. (in Chinese)
- [21] Hungr O, Mcdougall S. Two numerical models for landslide dynamic analysis[J]. Computers & Geosciences, 2009, 35(5): 978-992.
- [22] 张克亮. 贵州江口县土司城滑坡成因分析及滑距预测[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(3):29-33.  
Zhang K L. Cause analysis and sliding distance prediction for Tusi landslide in Guizhou province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(3): 29-33. (in Chinese)
- [23] Dai F C, Lee C F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong[J]. Geomorphology, 2002, 42(3/4): 213-228.
- [24] Lighthill M J, Whitham G B. On Kinematic waves. II. A theory of traffic flow on long crowded roads[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1955, 229(1178): 317-345.
- [25] Grimmett G, Welsh D. Probability: an introduction [M]. Oxford: Oxford University Press, 2014.
- [26] Lehmann E L, Romano J P, Casella G. Testing statistical hypotheses[M]. New York: springer, 2005.
- [27] Roberds W. Estimating temporal and spatial variability and vulnerability[C]//The International Conference on Landslide Risk Management. CRC Press, London: Landslide Risk Management, 2005: 139-168.

(本文编辑:赵霞)

(下转第 473 页)