

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.013

地震作用下滑坡水平运动距离概率预测模型*

陆 盟¹, 张 洁¹, 文思成²

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 地震诱发滑坡失稳是一种常见的地质灾害。如何预测地震作用下滑坡的水平运动距离对该地质灾害的防治具有重要作用。现有经验预测模型存在不能区分有阻碍滑坡和无阻碍滑坡, 依据的案例较少且只能提供滑坡水平运动距离的最优估计值而无法提供其预测误差的局限。针对上述不足, 首先建立包含380个案例的地震滑坡水平运动距离案例库, 基于最大似然法原理, 提出可同时考虑有阻碍滑坡和无阻碍滑坡的地震滑坡运动距离经验模型标定方法。单因素回归分析表明, 地震作用下滑坡水平运动距离与滑坡垂直运动距离和滑坡体积具有较高的相关性, 与滑坡倾角和滑坡表面长宽比相关性较小。在此基础上, 通过逐步回归的方法建立滑坡水平运动距离的多因素预测模型。案例分析表明, 提出的模型具有较高的预测精度。提出的地震作用下滑坡水平运动距离预测模型可为地震滑坡危险性评价提供参考。

关键词: 地震滑坡; 水平运动距离; 最大似然法; 概率预测模型

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0092-08

Probabilistic Model for Prediction of Seismic Landslide Travel Distance

LU Meng¹, ZHANG Jie¹, WEN Sicheng²

(1. Tongji University, College of Civil Engineering, Shanghai 200092, China;

2. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China)

Abstract: Seismic landslide is a common geological hazard. The prediction of seismic landslide travel distance is essential for the prevention and control of geological hazards. The current existing empirical prediction models could not distinguish between hindered and unhindered landslides and had fewer cases. Additionally, these models could only provide the optimal estimation of the horizontal motion distance of landslides without relative error. In view of the above shortcomings, this paper firstly established a database of 380 cases about seismic landslides travel distance. Applying the maximum likelihood method, a calibration method of seismic landslides travel distance empirical model considering both hindered and unhindered landslides were developed. Single factor regression analysis showed that the seismic landslide horizontal travel distance was highly correlated with the vertical sliding distance and volume of the landslide, but less correlated with the slope angle and the aspect ratio of the landslide surface. Based on the results, multi-factor prediction models of seismic landslide horizontal travel

* 收稿日期:2018-11-29;修回日期:2019-02-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41672276)资助

作者简介:陆 盟(1998-),男,博士生。主要从事岩土工程可靠度与风险分析方面的研究。Email: lumeng@tongji.edu.cn

通讯作者:张 洁(1980-),男,副教授,博士。主要从事岩土工程可靠度与风险分析方面的研究。

Email: cezhangjie@tongji.edu.cn

distance were established by a stepwise regression method. Cases analysis demonstrated that the proposed model has a higher prediction accuracy. The proposed prediction model of seismic landslide horizontal travel distance could provide references for seismic landslide risk assessment.

Keywords: seismic landslide; horizontal travel distance; maximum likelihood method; probabilistic prediction models

引言

近年来,地震引起的滑坡灾害对人类社会造成了巨大威胁,滑坡运动距离作为滑坡风险定量评价的重要依据,能够较为准确地预测帮助人们生命财产免于灾害。目前,对于地震滑坡距离的预测方法大致分为3类^[1]:

(1)刚体质点运动预测模型:这种方法假设滑坡为刚体运动,研究滑坡要素间的关系,利用基本物理运动方程计算滑坡运动距离。如A.E.Scheidegger^[2]提出的摩擦模型,首先给出了滑坡体积与滑坡摩擦系数间的预测公式,再应用物理方程对滑坡运动距离进行计算。

(2)连续或非连续理论分析预测模型:这种方法主要应用连续性或非连续性数值分析方法模拟滑坡全过程进而得到滑坡滑动距离。如O.Hung^[3]应用等效流体模型预测了滑坡滑动距离。

(3)经验统计预测模型:这种方法主要是基于实测地震滑坡数据,应用统计学方法获得滑动距离与相关因素的经验公式。

第一类模型,主要适用于较为理想的地震滑坡运动距离计算,部分参数难以取值。第二类模型计算量大,建模需要较多的参数和地质勘察数据^[4]。第三类模型方法简单、使用方便,获得了广泛的关注。王克鲁等^[5]对公元前1177年至公元1969年的2000多次5.0级以上的地震滑坡灾害进行总结,研究了最大滑坡运动距离与震级的关系;J.H.Lee等^[6]发现,地震滑坡的最大落差与最大水平运动距离之比随滑坡体积的增大而减小;辛鸿博等^[7]对中国近800年间125次历史地震造成的285例典型滑坡进行分析,提出了以场地烈度、震级、震中距为标准的地震滑坡判断准则;P.Budetta等^[8]对意大利南部的25个地震滑坡运动距离和体积的统计结果表明,滑坡的水平运动距离与滑坡体体积存在正相关关系;黄润秋^[9]研究表明,地震滑坡在运动学特征上具有显著的规模效应,即随滑坡体积的增大,摩擦角呈

指数迅速降低,从而出现高速、远程的滑动特征;G.Devoli等^[10]对中美洲33个地震滑坡的统计结果表明,滑坡的水平运动距离与滑体体积有较好的正相关关系。李秀珍等^[11]收集了汶川地震中发生的46个滑坡实例,分析了滑坡运动距离与体积、坡度等的相关关系;樊晓一^[12]基于若干滑坡实例研究了滑坡运动距离与场地因素的相关关系;周健^[13]基于地震滑坡实例数据确定了滑坡运动距离相关因素的比重因子并建立了预测模型;樊晓一等^[14]基于国内近几年的地震滑坡数据研究了滑坡体积与运动距离之间的关系;樊晓一等^[15]对未受河流阻止的地震滑坡运动距离进行了研究,并利用经验预测公式进行堵江判别;樊晓一等^[16]研究了坡脚型和偏转型地震滑坡经验预测公式;孟华君等^[17]对都江堰地区51个地震滑坡案例进行了统计,回归分析了滑坡运动距离与滑坡体积、高差、坡度和表面长宽比间的关系。

上述研究对预测地震作用下滑坡的运动距离提供了借鉴。目前经验预测模型中存在三点不足。第一,部分滑坡受地形地貌的限制,其滑动距离要小于同等条件下不受地形地貌限制的滑坡的滑动距离,现有分析中基本没有区分有阻碍滑坡和无阻碍滑坡运动距离的区别。第二,经验预测公式不可避免地存在模型误差,基于经验预测获得的滑坡滑动距离也具有显著的不确定性。第三,经验公式的建立对数据库有较强的依赖性。现有经验公式采用的案例数多小于100,由此获得的经验公式可能缺乏代表性。针对以上不足,在系统搜集国内外地震滑坡案例的基础上,应用最大似然法区分有阻碍滑坡和无阻碍滑坡,建立了地震滑坡滑动距离概率预测模型,并对模型的误差进行了标定,研究对更合理地利用经验模型对地震滑坡的运动距离进行预测具有积极意义。

1 地震滑坡案例库及分析

图1给出了典型的地震作用下滑坡运动距离示

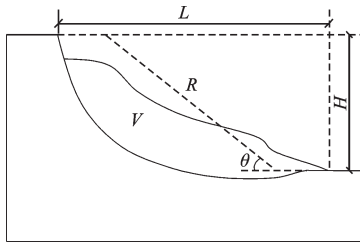


图1 地震滑坡变量

Fig. 1 Seismic landslide variable

意,其中 L 为滑坡水平滑动距离, V 为滑坡体积, H 为滑坡垂直运动距离, θ 为滑坡角度, R 为滑坡表面长宽比,当 R 大于1时为狭长形滑坡,小于1时为宽展形滑坡。

为建立可靠的地震滑坡运动距离经验预测模型,本文系统收集了1989~2013年间国内外380个地震滑坡案例,其中国内259例,国外121例。详细情况见表1。

表1 数据统计
Table 1 Data statistics

地震名称	无阻碍	有阻碍	总案例	参考文献
汶川地震 (2008)	82	26	108	文献[9, 11-12, 17-21]
玉树地震(2010)	84	0	84	文献[22]
庐山地震(2013)	44	7	51	文献[23-25]
国内其他地震	16	0	16	文献[26]
普雷塔地(1989)	48	0	48	文献[27]
克什米尔地震 (2005)	54	0	54	文献[27]
国外其他地震	19	0	19	文献[28-30]
总计	347	33	380	

基于380例地震滑坡数据,我们对图1中提到的地震滑坡变量进行了统计分析。由滑坡水平滑动距离的分布可知,水平滑动距离 <400 m、在 $400\sim 1\,000$ m以及 $>1\,000$ m的滑坡分别占总滑坡的60%、27%和13%。

通常,体积 $<10\times 10^4$ m³的滑坡称为小型滑坡;体积在 10×10^4 m³和 100×10^4 m³之间的称为中型滑坡;在 100×10^4 m³和 $1\,000\times 10^4$ m³之间的称为大型滑坡; $>1\,000\times 10^4$ m³的称为超大型滑坡^[31]。从滑坡体积的分布可知,案例库中小型滑坡、中型滑坡、大型滑坡和超大型滑坡的比例分别为42%、

34%、15%和9%。

从滑坡垂直运动距离的分布可知,垂直运动距离 <500 m、在 $500\sim 1\,000$ m以及 $>1\,000$ m的滑坡分别占总滑坡的81%、18%和1%。

从滑坡角度的分布可知,坡度 $<30^\circ$ 、在 $30^\circ\sim 50^\circ$ 以及 $>50^\circ$ 的滑坡分别占总滑坡的27%、72%和1%。

从滑坡表面长宽比的分布可知,长宽比 <1 和 >1 的滑坡分别占总滑坡的53%和47%。

2 滑坡运动距离经验模型标定方法

在地震滑坡运动距离预测中,滑坡水平运动距离 L 为因变量,自变量包括滑坡体积 V ,垂直运动距离 H ,滑坡坡度 θ 以及表面长宽比 R 。当采用单一因变量对水平运动距离进行预测时,可建立滑坡运动距离的单因素预测模型;当采用多个因变量对水平运动距离进行预测时,可建立滑坡运动距离的多因素预测模型。目前,滑坡运动距离经验模型的建立过程中多不考虑有阻碍滑坡和无阻碍滑坡的区别。本文将采用最大似然法对滑坡运动距离经验模型进行预测,可同时考虑有阻碍滑坡和无阻碍滑坡的影响。

$g(\theta)$ 代表滑坡运动距离经验模型,其中 θ 为待标定模型参数。 ϵ 为滑坡真实水平运动距离与经验预测模型之间的误差。经验预测模型、模型误差的关系可表达为:

$$L = g(\theta) + \epsilon \quad (1)$$

式中,误差项服从均值为0;标准差为 σ 的正态分布。

基于上述假设,观测到某一无阻碍滑坡运动距离 d_i 的概率密度为:

$$f(d_i | \theta) = \varphi \left[\frac{d_i - g(\theta)}{\sigma} \right] \quad (2)$$

式中, φ 为标准正态分布的概率密度函数。

对于有阻碍滑坡,如果不存在地形地貌限制,滑坡的运动距离可能会大于实际观测距离 d_i 。因此,给定 θ ,观测到某一有阻碍滑坡 d_i 的概率为:

$$p(d_i | \theta) = 1 - \Phi \left[\frac{d_i - g(\theta)}{\sigma} \right] \quad (3)$$

假设数据库中存在 N_1 个无阻碍滑坡和 N_2 个有阻碍滑坡。给定 θ ,同时观测到上述 $N_1 + N_2$ 个案例数据的概率为:

$$l(\theta | D) = \prod_{i=1}^{N_1} f(d_i | \theta) \prod_{i=1}^{N_2} p(d_i | \theta) \quad (4)$$

上式即为待标定系数 θ 的似然性函数。基于最大似然性原理,使得上述似然性函数取最大值的模型参数即为最优模型参数。

由式(4)可以看出,上述公式同时考虑了有阻碍滑坡和无阻碍滑坡的影响,因此可同时运用有阻碍滑坡和无阻碍滑坡案例对模型进行标定。此外,模型误差也可通过最大似然法同时获得。上述公式既可用于单因素模型的标定,也可用于多因素模型的标定。

3 单因素预测模型

3.1 滑坡体积与水平运动距离

图2给出不同案例 $\lg L$ 和 $\lg V$ 之间的关系。由图可知, $\lg L$ 与 $\lg V$ 呈现较好的线性关系,即滑坡体积越大,水平运动距离越远。基于极大似然法可获得 $\lg L$ 与 $\lg V$ 的关系如下:

$$\lg L = 0.61 + 0.36 \lg V \quad (5)$$

式中, σ 为0.31。

图2同时给出了上述模型预测结果95%的置信区间。在这里,我们采用调整 R^2 对回归模型拟合优度进行评价。调整 R^2 相比于评价指标 R^2 能够考虑到回归方程参数数目和样本数量的影响,更加客观地反映回归方程的拟合优度,调整 R^2 越大,拟合优度越高^[32]。下文的单因素预测模型和多因素预测模型均采用该指标进行评价。图2中回归模型的调整 R^2 为0.71。

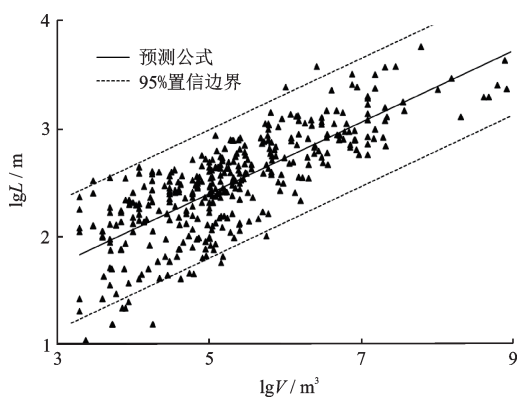


图2 $\lg L$ — $\lg V$ 相关关系

Fig. 2 Relationship between $\lg L$ and $\lg V$

3.2 滑坡垂直运动距离与水平运动距离

图3给出不同案例 $\lg L$ 和 $\lg H$ 之间的关系。 $\lg L$ 与 $\lg H$ 呈现较好的线性关系,即滑坡垂直运动距离

越大,水平运动距离越远。基于极大似然法可获得 $\lg L$ 与 $\lg H$ 的关系如下:

$$\lg L = 0.349 + 0.929 \lg H \quad (6)$$

式中, σ 为0.30。

图3同时给出了上述模型预测结果95%的置信区间。该回归模型的调整 R^2 为0.70。

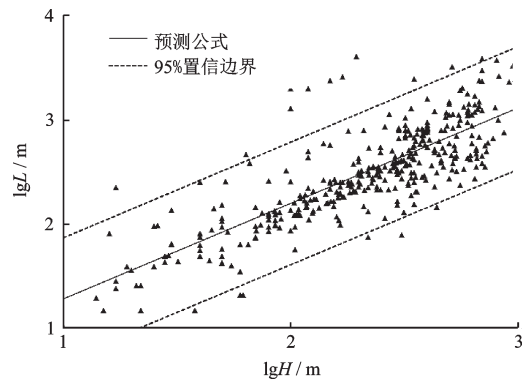


图3 $\lg L$ — $\lg H$ 相关关系

Fig. 3 Relationship between $\lg L$ and $\lg H$

3.3 滑坡角度与水平运动距离

数据库中包含滑坡角度的案例共有150例。图4给出不同案例 $\lg L$ 和 $\tan \theta$ 之间的关系。随着滑坡角度的增大,滑坡水平运动距离呈下降趋势。文献中常采用线性模型描述两者之间的关系。基于极大似然法可获得 $\lg L$ 与 $\tan \theta$ 的关系如下:

$$\lg L = 3.322 - 1.177 \tan \theta \quad (7)$$

式中, σ 为0.69。

图4同时给出上述模型预测结果95%的置信区间。该回归模型的调整 R^2 为0.15,表示两者之间的相关性相对较弱。

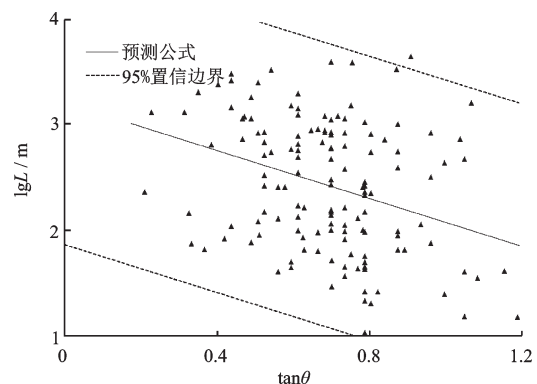


图4 $\lg L$ — $\tan \theta$ 相关关系

Fig. 4 Relationship between $\lg L$ and $\tan \theta$

3.4 滑坡表面长宽比与水平运动距离

数据库中包含滑坡表面长宽比的案例共有 51 例。图 5 给出不同案例 $\lg L$ 和 R 之间的关系。由图可知,随着滑坡表面长宽比的增大,滑坡水平运动距离呈增加趋势。基于极大似然法可获得 $\lg L$ 与 R 的关系如下:

$$\lg L = 1.57 + 0.26R \quad (8)$$

式中, σ 为 0.28。

图 5 同时给出上述模型预测结果 95% 的置信区间。该回归模型的调整 R^2 为 0.34, 表示两者之间的相关性相对较弱。

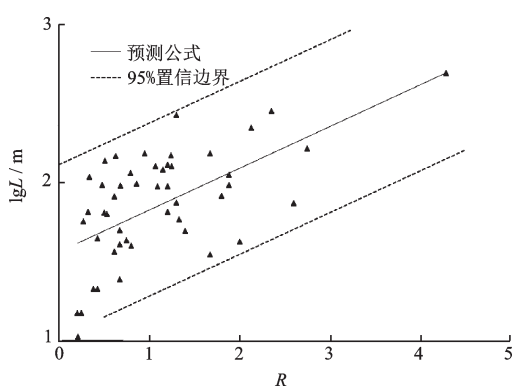


图 5 $\lg L-R$ 相关关系

Fig. 5 Relationship between $\lg L$ and R

由上述分析可知,滑坡水平运动距离与滑坡体积的相关性最高,与坡度的相关性相对较小。李秀珍等^[11]也获得过类似的发现。

4 多因素预测模型

由上述分析可知,滑坡水平运动距离 $\lg L$ 与滑坡体积 $\lg V$ 、滑坡垂直运动距离 $\lg H$ 、坡度 $\tan\theta$ 以及滑坡长宽比 R 都存在一定的相关性,考虑多个参数可能会提高滑坡水平运动距离预测公式的精度。考虑上述四个因素回归模型的一般表达式为:

$$\lg L = \theta_1 + \theta_2 \lg V + \theta_3 \lg H + \theta_4 \tan\theta + \theta_5 R + \epsilon \quad (9)$$

由于存在较多候选因素且不同候选因素与滑坡水平运动距离的相关性不同,如果直接考虑全部候选因素的回归模型可能无法得到最佳回归模型。因此,本文采用逐步回归分析方法来建立滑坡水平运动距离的预测模型。在逐步回归分析中,候选因素每次进入一个,每一步中因素都会根据调整 R^2 被重新评价,当引入的因素降低了回归模型的调整 R^2

则该因素被剔除,直到获得最优回归模型^[32]。

(1)单因素分析表明,滑坡水平运动距离与滑坡体积和滑坡垂直运动距离相关性最大,因此,可首先建立基于滑坡体积及垂直运动距离的多因素预测模型如下:

$$\lg L = 0.22 \lg V + 0.57 \lg H \quad (10)$$

式中, σ 为 0.20。

该回归模型的调整 R^2 为 0.81。

(2)为研究滑坡倾角在多因素预测模型中对滑坡水平运动距离的影响,可建立基于滑坡体积、垂直运动距离以及坡度的多因素预测模型如下:

$$\lg L = 0.25 \lg V + 0.51 \lg H \quad (11)$$

式中, σ 为 0.25。

该回归模型的调整 R^2 为 0.73。该模型中 $\tan\theta$ 的系数为 0,故该模型退化为基于滑坡体积与滑坡垂直运动距离的水平距离预测模型。比较式(10)、(11)发现,两次回归分析获得的模型并不完全一致。这是因为式(10)是对同时具有滑坡体积和滑坡垂直运动距离的案例进行分析,获得的案例数共有 380 个;而公式(11)是对滑坡体积、滑坡垂直运动距离以及坡度进行分析,获得的案例数共有 150 个。式(10)与式(11)的区别体现了数据库大小对回归模型的影响。由于式(11)的调整 R^2 更小,说明考虑滑坡倾角不能增加回归模型的拟合优度。根据逐步回归原理,滑坡倾角可从回归分析中剔除。

(3)为研究滑坡表面长宽比在多因素预测模型中对滑坡水平运动距离的影响,可建立基于滑坡体积、垂直运动距离以及滑坡表面长宽比的多因素预测模型如下:

$$\lg L = 0.336 \lg V + 0.055 \lg H + 0.182R \quad (12)$$

式中, σ 为 0.13。

该回归模型的调整 R^2 为 0.72。由于式(12)的调整 R^2 比式(10)的调整 R^2 小,说明考虑滑坡表面长宽比不能增加回归模型的拟合优度。根据逐步回归原理,滑坡表面长宽比可从回归分析中剔除。最终得到最佳预测模型为式(10)。

5 模型比较

为验证本文提出模型的合理性,表 2 给出了本文数据库之外文报道的 14 个地震滑坡案例资料^[33-36],其中 7 组为有阻碍滑坡,7 组为无阻碍滑坡。表 2 同时给出了文献[11]与文献[12]以及本文提出

表2 模型比较

Table 2 Models comparison

地震滑坡名称	lgH	lgV	tan θ	lgL	模型			置信区间
					文献[11]	文献[12]	式(10)	
HigashiTakezawa ^[33]	1.8	6.3	1.7	2.7	2.4	2.3	2.4	2.0~2.8
Kizawa ^[33]	2.0	5.2	1.0	2.4	2.9	2.3	2.3	1.9~2.7
Terano ^[33]	1.8	5.7	1.2	2.6	2.6	2.2	2.3	1.9~2.7
Toge ^[33]	2.0	5.3	0.6	2.5	3.2	2.3	2.3	1.9~2.7
Jyunihiro ^[33]	1.7	5.2	0.6	2.4	2.8	2.0	2.1	1.7~2.5
Tsaoling ^[34]	2.8	8.2	0.5	3.5	4.6	3.5	3.5	3.1~3.9
Chiufengershan ^[35]	2.8	7.5	0.5	3.3	4.4	3.4	3.3	2.9~3.7
Carpathian1 ^[36]	2.5	5.9	1.0	3.0	3.6	2.8	2.8	2.4~3.2
Belbek ^[36]	2.3	9.1	0.4	3.6	4.1	3.3	3.3	2.9~3.7
Frontovoye ^[36]	2.2	8.8	0.5	3.4	3.9	3.2	3.2	2.8~3.6
Kacha1 ^[36]	2.2	8.9	0.4	3.4	3.8	3.1	3.2	2.8~3.6
Kacha2 ^[36]	2.0	8.3	0.3	3.1	3.7	2.9	3.0	2.6~3.4
Alma ^[36]	2.1	8.6	0.4	3.3	3.8	3.0	3.1	2.7~3.5
Vishennoye ^[36]	2.2	8.6	0.4	3.4	3.9	3.1	3.2	2.8~3.6
残差平方和					5.0	1.0	0.5	

的模型的滑坡水平运动距离预测结果。预测结果残差平方和分别为5.0、1.0、0.5。本文提出的预测模型残差最小。此外,本文模型不但能提供滑坡水平运动距离的最优估计值,还能获得滑坡水平运动距离的置信区间。14组案例中滑坡实际运动距离均处于本模型提出的95%置信区间之内。

6 结论

(1)通过对国内外380个地震滑坡实例数据进行搜集和整理,区分无障碍滑坡和有阻碍滑坡分别为347例和33例,建立较为完备的地震诱发滑坡水平运动距离案例库。

(2)基于最大似然性原理,提出可考虑无障碍滑坡和有阻碍滑坡的滑坡水平运动距离的模型标定方法。提出的方法不但可以获得滑坡水平运动距离的最优估计,还能获得其置信区间。

(3)单因素分析表明,滑坡水平运动距离与滑坡体积的相关性最高,其次为滑坡垂直运动距离,滑坡表面长宽比,与滑坡倾角相关性最差。逐步线性回归分析表明,基于滑坡体积和垂直运动距离的滑坡水平运动距离预测模型的拟合优度最高。

参考文献:

- [1] 詹威威,黄润秋,裴向军,等. 沟道型滑坡-碎屑流运动距离经验预测模型研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(1): 154-163.
Zhan W W, Huang R Q, Pei X J, et al. Empirical prediction model for movement distance of channel landslide-clastic flow [J]. Journal of Engineering Geology. 2017, 25(1): 154-163.(in Chinese)
- [2] Scheidegger A E. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1973, 5(4): 231-236.
- [3] Hungr O, McDougall S. Two numerical models for landslide dynamic analysis [J]. Computers and Geosciences, 2009, 35(5): 978-992.
- [4] 吴钟腾,叶龙珍,郑之望,等. 基于运动学原理的滑坡运动距离预测方法研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(增1): 673-680.
Wu Zh T, Ye L Zh, Zheng Zh W, et al. Study on prediction method of landslide movement distance based on kinematics principle [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(Sup 1): 673-680. (in Chinese)
- [5] 王克鲁,宋惠珍,刘慧敏. 中国地震震害特征及其意义[J]. 地震地质, 1983, 5(1): 59-69.
Wang K L, Song H Zh, Liu H M. The earthquake

- damage characteristics of China and significance [J]. *Seismological Geology*, 1983, 5(1): 59-69. (in Chinese)
- [6] Lee J H, Sassa K. A study on the apparent friction angle mobilized during the undrained loading in long run-out landslides [J]. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute*. 1996, 45(4): 99-124.
- [7] 辛鸿博, 王余庆. 边坡地震崩滑及其初判准则[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(5): 591-594.
Xin H B, Wang Y Q. Slope seismic slip and its preliminary judgment criterion[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(5): 591-594. (in Chinese)
- [8] Budetta P, Riso R D. The mobility of some debris flows in pyroclastic deposits of the northwestern Campanian region (southern Italy)[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2004, 63(4): 293-302.
- [9] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(3): 433-454.
Huang R Q. Large-scale landslide and pathogenesis in China since twentieth century[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese)
- [10] Devoli G, Blasio F V D, Elverhoi A, et al. Statistical analysis of landslide events in central America and run-out distance[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27(1): 23-42.
- [11] 李秀珍, 孔纪名. “5.12”汶川地震诱发滑坡的滑动距离预测[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, 42(5): 243-249.
Li X Zh, Kong J M. Prediction of sliding distance of landslides induced by “5.12” Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, 42(5): 243-249. (in Chinese)
- [12] 樊晓一. 地震与非地震诱发滑坡的运动特征对比研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(2): 31-37.
Fan X Y. A comparative study of motion characteristics of landslides between earthquakes and non-earthquakes [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2010, 31(2): 31-37. (in Chinese)
- [13] 周建. 典型滑坡危险度预测的距离判别分析模型[J]. *长江科学院院报*, 2010, 27(7): 17-21.
Zhou J. Distance discriminant analysis model for prediction of typical landslide risk [J]. *Journal of Yangtze Academy of Sciences*, 2010, 27(7): 17-21. (in Chinese)
- [14] 樊晓一, 乔建平, 韩萌, 等. 灾难性地震和降雨滑坡的体积与运动距离研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(10): 3 051-3 058.
Fan X Y, Qiao J P, Han M, et al. Study on volume and movement distance of catastrophic earthquakes and rainfall landslides [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2012, 33(10): 3 051-3 058. (in Chinese)
- [15] 樊晓一, 黄润秋, 乔建平, 等. 未受河流阻止的滑坡水平运动距离与滑坡堵江判别[J]. *水文地质与工程地质*, 2014, 41(1): 128-133.
Fan X Y, Huang R Q, Qiao J P, et al. Distance of horizontal movement of landslides not blocked by rivers and discrimination of landslides blocking rivers[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2014, 41(1): 128-133. (in Chinese)
- [16] 樊晓一, 冷晓玉, 段晓东. 坡脚型与偏转型地震滑坡运动距离及地形因素影响[J]. *岩土力学*, 2015, 36(5): 1 380-1 388.
Fan X Y, Leng X Y, Duan X D. The movement distance between slope foot type and transition earthquake landslide and the influence of topographic factors [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2015, 36(5): 1 380-1 388. (in Chinese)
- [17] 孟华君, 姜元俊, 张树轩, 等. 汶川地震前后都江堰山区滑坡滑动距离影响因素变化分析[J]. *地质力学学报*, 2017, 23(6): 904-912.
Meng H J, Jiang Y J, Zhang Sh X, et al. Analysis on the influence factors of landslide sliding distance in Dujiangyan mountain area before and after Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Geomechanics*, 2017, 23(6): 904-912. (in Chinese)
- [18] 崔鹏. 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.
Cui P. Formation mechanism and risk control of mountain disasters caused by Wenchuan earthquake [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [19] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(4): 433-444.
Yin Y P. Study on Geological hazards of Wenchuan M8 earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(4): 433-444. (in Chinese)
- [20] 张永双, 石菊松, 孙萍, 等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例[J]. *地质力学学报*, 2009, 15(2): 131-141.
Zhang Y Sh, Shi J S, Sun P, et al. Inside and outside dynamic coupling and disaster examples of Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15(2): 131-141. (in Chinese)
- [21] 许强. 汶川地震大型滑坡研究[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 412.
Xu Q. Study on large-scale landslides in Wenchuan

- earthquake[M]. Beijing: Science Press, 2009: 412. (in Chinese)
- [22] Zhang S, Zhang L M, Xiang B, et al. Travel distances of earthquake-induced landslides[C]//Stability and performance of slopes and embankments III. Washington D C: ASCE Press, 2013, 991-1 001.
- [23] 王运生, 罗永红, 吉峰, 等. 汶川大地震山地灾害发育的控制因素分析[J]. 工程地质学报, 2008, 16(6): 41-45.
Wang Y Sh, Luo Y H, Ji F, et al. Analysis of control factors of mountain disaster development in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(6): 41-45.(in Chinese)
- [24] 辛鹏, 吴树仁, 杨为民, 等. 陕西省麟游县丈八乡滑坡群的形成机理与堰塞湖危险性评价[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 1 085-1 092.
Xin P, Wu Sh R, Yang W M, et al. Formation mechanism of landslide group and risk assessment of barrier lake in Zhangbaxiang, Linyou County, Shaanxi Province[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(8): 1 085-1 092. (in Chinese)
- [25] 曾超, 李曙平, 李群. 地震灾区公路滑坡发育特征及形成机理分析[J]. 公路工程, 2009, 34(3): 143-146.
Zeng Ch, Li Sh P, Li Q. Development characteristics and formation mechanism of highway landslides in earthquake-stricken areas[J]. Highway Engineering, 2009, 34(3): 143-146. (in Chinese)
- [26] Guo D, Hamada M, He C, et al. An empirical model for landslide travel distance prediction in Wenchuan earthquake area[J]. Landslides, 2014, 11(2): 281-291.
- [27] Basharat M, Rohn J. Effects of volume on travel distance of mass movements triggered by the 2005 Kashmir earthquake, in the Northeast Himalayas of Pakistan [J]. Natural Hazards, 2015, 77(1): 1-20.
- [28] Lagmay A M A, Ong J B T, Dan F D F, et al. Scientists investigate recent Philippine landslide [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2006, 87(12): 121-124.
- [29] Mcsaveney M J. Chapter 6-sherman glacier rock avalanche, Alaska, USA [J]. Developments in Geotechnical Engineering, 1978, 14(Part A): 197-258.
- [30] Trunk F J, Dent J D, Lang T E. Computer modeling of large rock [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(3): 348-360.
- [31] Qi S, Xu Q, Zhang B, et al. Source characteristics of long run out rock avalanches triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(4): 896-906.
- [32] Robert I. Kabacoff. R in Action[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2016: 190-191.
- [33] Chigira M, Yagi H. Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake in Japan [J]. Engineering Geology, 2006, 82(4): 202-221.
- [34] Chen R F, Chan Y C, Angelier J, et al. Large earthquake-triggered landslides and mountain belt erosion: the Tsaoling case, Taiwan [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2005, 337(13): 1 164-1 172.
- [35] Shou K J, Wang C F. Analysis of the Chiufengshan landslide triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan [J]. Engineering Geology, 2003, 68(3/4): 237-250.
- [36] Panek T, Hradecky J, Silhan K. Geomorphic evidence of ancient catastrophic flow type landslides in the mid-mountain ridges of the Western Flysch Carpathian Mountains (Czech Republic) [J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(1): 88-98.

(本文责编:周小潭)