

文章编号: 1000-7598-(2007)12-2565-05

蒙特卡罗模拟在区域地震滑坡灾害评价中应用

汪华斌¹, Sassa Kyoji²

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院 武汉 430074; 2. 京都大学 防灾研究所 日本京都 宇治 611-0011)

摘要: 2004年10月23日,日本新潟中越地区发生史上最强地震之一,震级达到Mw6.6。这次地震诱发上千个规模大小不一、形式多样的滑坡,造成一定的灾害损失和人员伤亡。因此,为了有效地避免和减轻这方面的灾害,有必要有效地、科学地预测和评价地震诱发滑坡的空间发生规律。为此以一定的地区作为研究对象,提出了蒙特卡罗随机模拟和Newmark滑动体位移分析法在区域地震斜坡失稳概率分析中的应用。该法充分考虑到岩土参数和相关地震参数空间变异性,结合地理信息系统空间分析的优势,以网格模型为基础,分析该区斜坡滑动体位移分布规律,并以2 cm为失稳临界值探讨网格斜坡破坏的概率。实例证明,所提出的模型有效地预测了滑坡发生的空间分布规律。

关键词: 地震滑坡; Newmark 滑动体位移模型; 蒙特卡罗随机模拟; 概率分析;
中图分类号: O 242 **文献标识码:** A

Probabilistic modeling of seismically triggered landslides using Monte Carlo simulations

WANG Huai-bing¹, Kyoji. Sassa²

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan)

Abstract: The 2004 Chuetsu earthquakes of Niigata (Japan) triggered numerous landslides, and the most widespread types of landslides were highly disrupted, relatively shallow slides and soil (debris) flows. To avoid and mitigate such seismic landslide hazard, this paper presents a method to evaluate the probability of slope failures using Newmark displacement on a pixel-by-pixel basis in a given area. The proposed method was able to integrate Newmark displacement modeling and Monte Carlo simulations with geographic information systems (GIS). In the modeling, an empirical attenuation relationship was utilized to calculate Arias intensity over this study area; and the variability of geotechnical parameters was taken into account to calculate coseismic displacement. After deriving the displacement from related inputs, the Monte Carlo simulations ran 1 000 times, and generated 1 000 displacement values for each grid cell; and then the displacement mean and standard deviation were calculated and its probabilistic distribution can be obtained. Finally, given 2 cm as a threshold value of displacement, estimated probabilities of displacement exceeding 2 cm were shown as a map of seismic landslide hazard. The resulting map was classified into four categories from very low to high level.

Key words: earthquake-induced landslide; Newmark displacement; probabilistic analysis; Monte Carlo simulations

1 前言

地震滑坡因其巨大的致灾力而广泛引起人们的关注,据不完全统计近几十年地震滑坡已经造成了数万人丧生和几十亿美元的损失,强烈地震时地震诱发的滑坡崩塌灾害,特别是在山岳地区,其危

害比地震直接造成的还要大。例如,于1970年秘鲁 Nevados Huascarán 地区发生的地震诱发巨大的岩体岩崩,导致两个小城被毁,18 000多人死亡^[1]。同时,1994年新近发生的加利福尼亚 Northridge 地震和1999年的台湾集集地震诱发无数的滑坡^[2,3],许多道路被毁,交通严重受到影响,大量的房屋被

收稿日期: 2005-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(No. 50539110)和国家科技部支撑计划项目联合资助(No. 2006BAC04B05)。

作者简介: 汪华斌,男,1968年生,博士,从事滑(边)坡岩土力学和滑坡灾害风险评价研究。

土石淹没或摧毁,造成难以挽回的经济损失和人员伤亡。因此,为了有效地防止或减轻这类灾害的损失,区域地震滑坡灾害危险性评价是极其重要的环节之一,在一定程度上它可以预测滑坡有可能发生的地区。最近十年间,许多研究者应用各种不同的方法^[4-8],包括多元统计、准静态估计和 Newmark 滑动体位移分析法,特别是结合地理信息系统的强大空间分析功能,比较成功地完成了一部分地区地震诱发滑坡的灾害危险性分区。其中,应用比较多的是以简化的斜坡岩土模型为基础,结合 Newmark 滑动体位移分析模型,应用确定性的方法计算地震条件下斜坡体位移。与确定性的方法不同的是,概率分析法由于考虑到岩土或地震相关参数空间分布的变异性以及模型不确定性越来越引起广泛的关注,特别是一次二阶矩阵、蒙特卡罗随机模拟等随机概率计算方法可以很有效地预测地震诱发滑坡的可能性和评估模型的可靠性^[9-13]。

2004 年 10 月 23 日,日本新潟中越地区发生史上最强地震之一,震级达到 Mw6.6。这次地震诱发上千个规模大小不一、形式多样的滑坡灾害,但是绝大部分是发生在陡坡的浅层滑坡,也不乏许多大型的深层或顺层滑坡,造成一定的灾害损失和人员伤亡。因此,本研究以受地震诱发滑坡影响严重的地区之一为研究对象,考虑到岩土、地下水等相关参数概率分布的可能性,结合地理信息系统的强大空间分析功能,应用蒙特卡罗随机模拟技术,分析区域地震诱发滑坡的概率。

2 研究地区

2004 年 10 月 23 日,日本新潟中越地区发生 Mw6.6 级的强烈地震,震源中心位于 37.28° N 138.88° E 处,而且还伴有多次 6 级左右的余震^[14]。研究地区位于 Yamakoshi 村附近,面积约 70 km²(如图 1 所示)。从区域地质背景来讲,该区广泛分布沿 NNE~SSW 向的活动断裂和褶皱,并且地震影响区的活动断裂为倾向 NW 的逆断层^[15]。同时,在该地区出露的主要地层单元为第三纪中新世—上新世的沉积岩类,包括砂岩,泥岩和粉砂岩以及它们之间的互层^[16]。这些岩石曾遭受较强的断裂和褶皱作用,且风化程度较严重。为了便于简单考虑该地区岩土工程性质,岩土单元划分为以下几类:(1)表层堆积土;(2)砂、粉砂以及砂砾石;(3)中新世—上新世沉积岩类单元,以及中新世的火山碎屑岩和安山岩类(见图 2)。

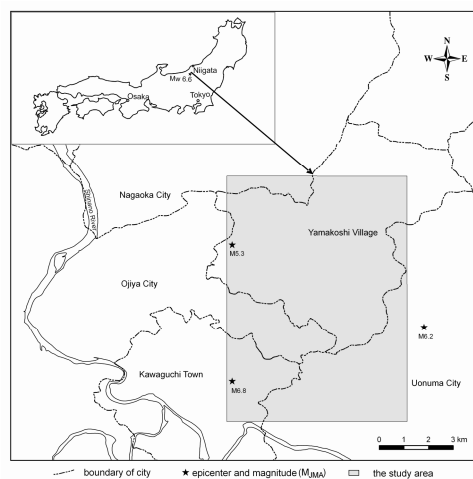


图 1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Geographic location of the study area

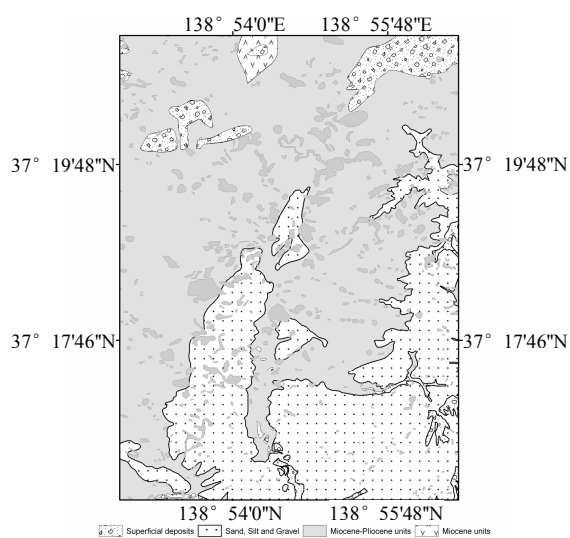


图 2 地震滑坡分布与岩土工程地质图
(深灰色单元为滑坡)

Fig.2 Seismic landslide distribution based on the engineering

中越地震造成的影响是很广泛的,不仅导致新干线火车脱轨,部分主干交通公路严重被毁,山区河流堵塞诱发小范围的洪水和泥石流,造成 40 人的死亡和严重的经济损失,而且导致大面积的山体滑坡和崩塌。研究区滑坡分布面积很广,类型多样^[17],总的来说,主要以分布零散的浅层滑坡为主,但也不乏大面积的深层滑坡。据野外调查发现,这些深层滑坡大部分都是受到地震的震动作用,在原来老滑坡体上沿层面或其他软弱结构面的再次活动。另外,值得注意的是,地震之前几天的强烈降雨使风化、松散的岩土进一步浸润、地下水位提高,以及当地养殖厂鱼池广为分布,这些因素无疑增加了斜坡失稳的风险。

3 研究方法和数据处理

3.1 Newmark 滑动体位移模型

Newmark 滑动体位移模型广泛用于计算地震过程中斜坡变形累积位移,主要基于 Newmark 的刚体滑动面假设和屈服加速度概念。在计算区域斜坡的地震引起的位移量之前,必须采用无限斜坡模型计算各单个斜坡体的安全系数 (F_S),算式如下:

$$F_S = \frac{c' + [(\gamma - m\gamma_w)z \cos^2 \alpha] \tan \phi'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha} \quad (1)$$

式中: c' 为黏聚力(kPa); ϕ' 为摩擦角; α 为坡角; m 为滑动条块被水浸透的厚度比例; z 为滑动面深度(m), γ 和 γ_w 则分别为岩(土)和水的重度(kN/m^3)。

屈服加速度则表示为

$$a_c = (F_S - 1)g \sin \alpha' \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度; α' 代表滑块推力角。如果针对浅层滑坡来讲, α' 值可以用坡角(α)代替。

在计算 Newmark 位移时,许多研究应用不同的指标,包括最大地表加速度、破坏潜力以及 Arias 震度等,通过统计方法导出不同的关系式^[5-19]。其中, Arias 震度得到广泛的应用,其与 Newmark 位移的关系表达如下^[5]:

$$\lg D_n = 1.521 \lg I_a - 1.993 \lg a_c - 1.546 \pm 0.375 \quad (3)$$

式中: D_n 单位为 cm; I_a 为 m/s 。

Arias 震度表述在每个地震记录台地震发生过程中的总能量,一般是地震加速度的平方在一定时间内的总和^[20],但也有其他的方式计算各记录台的 Arias 震度^[21]:

$$\lg I_a = M_w - 2 \log R - 4.1 \quad (4)$$

式中: M_w 为地震矩规模; R 为距震中的距离(km)。

由于研究区地震观测记录数据仅分布在有限的地震记录台,无法得到一定区域范围内的地震加速度方面的资料。因此,采用式(4)计算区域 Arias 震度,进而利用综合式(1)~(3)得到 Newmark 位移。

3.2 概率分析法

蒙特卡罗随机模拟等随机算法不同于一般的确定性数值方法,它最初是用来解决数学和物理问题的非确定性的(概率统计的或随机的)数值方法。它是用一系列随机数来近似解决问题的一种方法,是通过寻找一个概率统计的相似体并用试验取样过

程来获得该相似体的近似解的处理数学问题的一种手段。近些年来,蒙特卡罗随机模拟法在求解滑坡稳定可靠性指标和破坏概率方面行之有效,而且得到广泛的应用^[22]。蒙特卡罗随机模拟法确定随机数的基本原理是建立在概率密度函数的基础上,模拟的基本原理如下:

先在 $(0, 1)$ 区间上产生均匀分布随机数,可采用的方法有乘同余法、混合同余法等,其中混合同余法的递推公式为

$$x_i = (\lambda x_{i-1} + C) \quad (5)$$

$$r_i = x_i / M \quad (6)$$

式中: λ 、 x_0 、 C 和 M 为选定的常数。

将随机数序列 $\{r_i\}$ 转换为 (a, b) 区间上的均匀分布随机数序列 $\{R_i\}$ 如下:

$$R_i = a + (b - a)r_i \quad (7)$$

采用反函数法将均匀分布随机数 $\{r_i\}$ 转换为符合某一指定概率分布的随机数。其前提是经验分布的反函数存在,否则采用随机变量函数法。设 X 是具有分布函数 $F_x(x)$, 且反函数 $F_x^{-1}(x)$ 存在的连续随机变量, r 是均匀分布随机变量 R 的值。若给定累计概率 $F_x(x) = r$, 则有

$$x = F_x^{-1}(r) \quad (8)$$

若已知 $\{r_i\}$, 则可得到符合 $F_x(x)$ 的随机数序列:

$$x_i = F_x^{-1}(r_i) \quad (9)$$

本研究在假设与 Newmark 滑动体位移分析有关的各基本变量,如岩土力学参数、地下水位等的概率分布及其分布参数的前提下,对所有基本变量按统计特征进行随机采样,利用以地理信息系统为平台的应用模块重复 n 次独立随机采样进而估算位移超过一定临界值的概率,即是斜坡发生破坏的概率。

3.3 空间数据处理

区域地震滑坡灾害预测需要许多相关的数据,包括滑坡编目图、斜坡分布图、岩土(工程)地质图、地震 Arias 震度分布图以及其他相关图件和表格。因此,本次研究以地理信息系统为依托,建立 1:25 000 数字高程模型(网格单元 20 m),岩土单元分布图和地震相关参数矢量图,以表格的形式记载区域滑坡体滑动面深度、地下水位状况等。对于岩土力学相关参数,在广泛收集资料的前提下,结合部分试验结果^[23],统一假设均服从正态分布;由于研究对象是区域浅层滑坡,地震之前引起的降雨使各个滑坡的地下水位分布不一,因此,对于滑动条块被水渗透的厚度比例也假设服从正态分布,如下表 1 所示。

表 1 破坏概率分析中相关参数的概率分布型式
Table 1 Distribution patterns of input parameters used in the probabilistic analysis

岩土单元	黏聚力 c' / kPa	内摩擦角 $\phi' / (^{\circ})$	重度 $\gamma / \text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	m
表层堆积土	0	$\mu_{\phi'}=30 \quad \sigma_{\phi'}=2.5$	15	
砂, 粉砂及砂砾石	0	$\mu_{\phi'}=35 \quad \sigma_{\phi'}=3.5$	18	$\mu_m=0.5$ $\sigma_m=0.04$ ($z=8 \text{ m}$)
中新世—上新世沉积岩类	$\mu_{c'}=35 \quad \sigma_{c'}=5$	$\mu_{\phi'}=35 \quad \sigma_{\phi'}=4.5$	20	
中新世的火山碎屑岩和安山岩类	$\mu_{c'}=45 \quad \sigma_{c'}=5$	$\mu_{\phi'}=40 \quad \sigma_{\phi'}=3.5$	20	

* μ 代表平均值, σ^2 代表方差

4 结论与讨论

综合应用式 (1) ~ (4), 利用蒙特卡罗法随机模拟黏聚力、内摩擦角、地下水位等参数, 利用相关计算模块重复 1 000 次独立随机采样, 进而估算位移超过一定临界值的概率, 即斜坡发生破坏的概率。对于位移临界值的确定, 在分析类似的研究实例之后^[24,25], 结合本地区的具体情况, 确定 2 cm 为斜坡破坏的临界值, 得到研究区地震诱发滑坡概率分布图 (见图 3), 从低到高依次为非常低、低、中等和高。

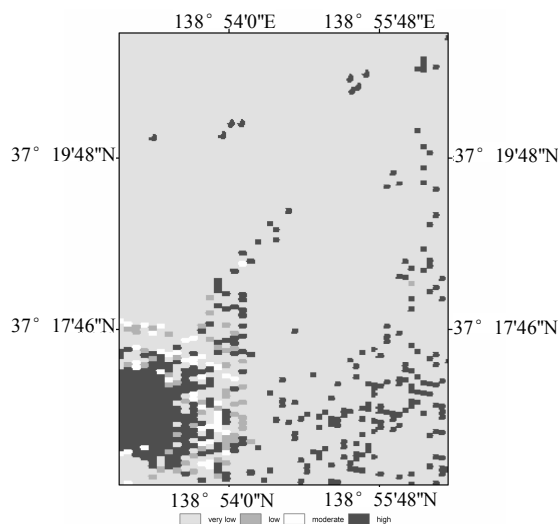


图 3 研究区区域滑坡灾害评价结果
Fig.3 Map showing seismically triggered landslide hazard in the study area

根据预测评价结果分析, 滑坡应该主要发生在震中附近, 63.6 % 的斜坡破坏发生在砂、粉砂以及砂砾石岩土单元内。实际上, 在震中地区只有部分斜坡失稳, 没有预测的那样集中和厉害; 据统计, 也只有 25 % 的滑坡发生在上述岩土地质单元内。

不过, 绝大部分已经发生滑坡的地区都被预测为中高风险区。不可否认的是, 有相当一部分没有发生滑坡的地区也被预测处于中高风险区。这样的预测结果可以说明, 模型本身和参数的难以准确估计的概率分布无疑会影响评价结果的可靠性。由于在确定岩土力学和滑块浸水比例的概率分布和分布参数时, 必须考虑到在地震发生之前, 全部网格单元 (代表单个斜坡) 的静态安全系数必须大于 1, 因此, 需要不断地调整各指标参数分布型式和分布参数, 满足这一目标。同时, 由于斜坡本身特征的差异, 以及计算过程中采用的岩土力学和其他参数的误差, 导致一定程度上的误判在所难免。另外, 研究区发生的许多深层滑坡是难以用简单的无限斜坡模型来描述, 而且 Arias 震度的计算方法和 Newmark 位移与其他相关参数之间的统计关系在该地区的适用性值得商榷。

5 结 语

本文以中越地震影响较为严重的地区作为研究对象, 在考虑到岩土力学参数、地下水位等参数的概率分布及其分布参数的前提下, 提出了蒙特卡罗随机模拟和 Newmark 滑动体位移分析法在区域地震斜坡失稳概率分析中的应用。研究中对所有基本变量按统计特征进行随机采样, 利用以地理信息系统为平台的应用模块重复 1 000 次独立随机采样进而估算位移超过 2 cm 的概率, 即斜坡发生破坏的概率。该法充分考虑到岩土参数和相关地震参数空间变异性, 结合地理信息系统空间分析的优势, 以网格模型为基础, 分析该区斜坡滑动体位移分布规律, 并以失稳临界值为基础探讨网格斜坡破坏的概率。实例证明, 本文提出的模型有效地预测了地震诱发滑坡发生的空间分布规律。

参 考 文 献

- [1] Plafker G, Ericksen GE, Fernández CJ. Geological aspects of the May 31, 1970, Peru earthquake[J]. *Seismological Society of America Bulletin*, 1971, 61: 543—578.
- [2] Parise M, Jibson RW. A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake[J]. *Engineering Geology*, 2000, 58: 251—270.
- [3] Hung JJ. Chi-Chi earthquake induced landslides in Taiwan[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Seismology*, 2000, 2(2): 25—33.

- [4] Miles SB, Ho CL. Rigorous landslide hazard zonation using Newmark's method and stochastic ground motion simulation[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1999, 18: 305—323.
- [5] Jibson RW, Harp EL, Michael JA. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps[J]. **Engineering Geology**, 2000, 58: 271—289.
- [6] Carro M, De Amicis M, Luzi L, Marzorati S. The application of predictive modeling techniques to landslides induced by earthquake: the case study of the 26 September 1997 Umbria-Marche earthquake (Italy) [J]. **Engineering Geology**, 2000, 69: 139—159.
- [7] Lin ML, Tung CC. A GIS-based potential analysis of landslides induced by the Chi-Chi earthquake [J]. **Engineering Geology**, 2003, 71: 63—77.
- [8] Newmark NM. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. **Geotechnique**, 1965, 15: 139—160.
- [9] Luzi L, Pergalani F. A correlation between slope failures and accelerometric parameters: the 26 September 1997 earthquake (Umbria-Marche, Italy) [J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2000, 20: 301—313.
- [10] Mankelov JM, Murphy W. Using GIS in the probabilistic assessment of earthquake triggered landslide hazards[J]. **Journal of Earthquake Engineering**, 1998, 2(4): 593—623.
- [11] Luzi L, Pergalani F, Terlien MTJ. Slope vulnerability to earthquakes as subregional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems[J]. **Engineering Geology**, 2000, 58: 313—336.
- [12] Capolongo D, Refice A, Mankelov J. Evaluating earthquake-triggered landslide hazard at the basin scale through GIS in the Upper Sele River valley [J]. **Surveys in Geophysics**, 2002, 23: 595—625.
- [13] Del Gaudio V, Wasowski. Time probabilistic evaluation of seismically induced landslide hazard in Iripinia (Southern Italy) [J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2004, 24(12): 915—928.
- [14] National Research Institute of Earth Science and Disaster Prevention. The 2004 mid Niigata earthquake. [y/md]: <http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/niigata041023>, available online.
- [15] Research Group for Active Faults. Active faults in Japan: Sheet Maps and Inventories[M]. Tokyo: University of Tokyo Press. 1980, 132—133.
- [16] Takeuchi K, Yanagisawa Y, Miyazaki J, Ozaki M. 1:50,000 digital geological map of the Uonuma region Open-file Report, No. 412[R]. Niigata Prefecture[s.l]: Geological Survey of Japan, 2004.
- [17] Geographical Survey Institute of Japan. Sheet map of the Chuetsu earthquake disaster in Niigata Prefecture, (scale 1:30,000)[R]. 2004.
- [18] Ambraseys NN, Menu JM. Earthquake-induced ground displacements [J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1988, 16: 985—1006.
- [19] Crespellani T, Madiati C, Vannucchi G. Earthquake destructiveness potential factor and slope stability[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(3): 411—419.
- [20] Arias A. A measure of earthquake intensity[A]. **Seismic design for nuclear power plants**[C]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press. 1970, 438—483.
- [21] Wilson RC, Keefer DK. Predicting areal limits of earthquake-induced landsliding. Earthquake hazards in the Los Angeles region—an earth-science perspective [C]. [s.l]: [s.m], 1985, 317—345.
- [22] Nadim F, Einstein H, Roberds W. Probabilistic stability analysis for individual slopes in soil and rock[A]. **Landslide risk management**[C]. London: Taylor & Francis Group, 2005, p. 63—98.
- [23] Sassa K, Hiroshi F, Wang FW, Wang GH. Dynamic properties of earthquake-induced large-scale rapid landslides within past landslide masses[J]. **Landslides**, 2005, 2(2): 125—134.
- [24] Wieczorek GF, Wilson RC, Harp EL. Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo County [R]. California: Miscellaneous Investigation Maps I-1257-E, (scale 1:62,500), [s.l]: U.S.G.S, 1985.
- [25] Jibson RW, Keefer DK. Analysis of the seismic origin of landslides: examples from the New Madrid seismic zone[J]. **Geological Society of America Bulletin**, 1993, 105: 521—536.