

张江伟, 李小军, 迟明杰, 刘辰. 2017. 地震作用下土质边坡类型划分. 地震学报, 39(2): 286-295. doi:10.11939/jass.2017.02.011.

Zhang J W, Li X J, Chi M J, Liu C. 2017. Type division of soil slopes under seismic action. Acta Seismologica Sinica, 39(2): 286-295. doi:10.11939/jass.2017.02.011.

## 地震作用下土质边坡类型划分<sup>\*</sup>

张江伟<sup>1),\*</sup> 李小军<sup>2)</sup> 迟明杰<sup>2)</sup> 刘 辰<sup>2)</sup>

1) 中国石家庄 050031 河北地质大学勘查技术与工程学院

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

**摘要** 本文研究分析了多种因素对土质边坡地震稳定性的不同影响程度, 认为影响作用较大的前 8 个因素分别为坡度、坡高、斜坡结构类型、降水、水系距离、黏聚力、内摩擦角和地震动参数. 利用层次分析法计算各因素的影响权重, 以综合性、操作性和适用性为原则, 将影响权重较高的因素作为划分指标, 将土质边坡划分为 4 大类, 每大类中再根据坡度的大小划分为缓坡、缓陡坡、陡坡和急坡等 4 个亚类. 划分结果可为地震作用下土质边坡稳定性的评价提供参考依据.

**关键词** 地震 土质边坡 层次分析法 类型划分

doi:10.11939/jass.2017.02.011

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

## Type division of soil slopes under seismic action

Zhang Jiangwei<sup>1),\*</sup> Li Xiaojun<sup>2)</sup> Chi Mingjie<sup>2)</sup> Liu Chen<sup>2)</sup>

1) College of Prospecting Technology and Engineering, Hebei GEO University,  
Shijiazhuang 050031, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

**Abstract:** The influence factors of soil slope seismic stability are multifarious and their impact extents are also various. In this study, we discuss the effect degree of each factor, and the results show that the key influence factors are slope grade, slope height, slope structure type, rainfall, drainage distance, cohesion force, internal friction angle and ground motion parameters. The method of analytic hierarchy process (AHP) is introduced into this research to determine the weight of each key factor. Based on integrity, operability and applicability, factors with higher weights, which partition the slopes into four types, are selected as the indexes of soil slope division, and each type is further classified into four sub-types according to slope gradients, including gentle slope, gentle steep slope, steep slope and more steep slope. The results can provide a reference basis for the stability evaluation of soil slope under seismic action.

<sup>\*</sup> 基金项目 国家自然科学基金项目(51639006, 51421005)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013601)和中央级公益性科研院所基本业务费专项(DQJB15C07)共同资助.

收稿日期 2016-04-21 收到初稿, 2016-08-24 决定采用修改稿.

<sup>+</sup> 通讯作者 e-mail: zjwok1988@sina.com



**Key words:** earthquake; soil slope; analytic hierarchy process; type division

## 引言

边坡是一个复杂难解的结构体,这种复杂难解源自于其自身材料特性和坡体内部结构等的不确定性。要想全面地认识、研究边坡在地震作用下的动力稳定性状态,需要对实际工程中的边坡进行总结分类,以便实现不同类型边坡地震稳定性的快速识别、评价和预测,同时为边坡工程的勘察评价、设计施工和运营维护等工作提供依据。

目前,边坡的分类方式主要为单因素分类法和多因素分类法两种。单因素分类法,一般按照边坡的成因、高度、材料、结构特征、使用年限和用途等单因素划分。例如孙玉科和徐义芳(1959)根据坡体材料的地质特性将边坡分为岩质岩石边坡、半岩质岩石边坡、黏性土质边坡、砂性土质边坡和特殊边坡,又根据边坡的工程类别将边坡分为路堑边坡、水坝边坡、露天矿边坡和建筑边坡等。多因素分类法的应用实例,例如《建筑边坡工程技术规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2014)中综合岩体完整程度、结构面结合程度、产状和自稳能力等4种因素来划分岩体;Deere等(1967)提出岩石质量指标(rock quality designation,简称为RQD)分类法,将岩体质量划分为5个等级,从Ⅰ级到Ⅴ级岩体质量由极好递减到极差;Bieniawski(1974)提出了一种更为全面的综合分类方法,即岩体地质力学分类法(rock mass rating,简称为RMR)。但上述分类方法的对象均为地下工程岩体。

总结前人的研究可知,根据单一因素对边坡进行分类,虽可以更直接地认识边坡,但因影响边坡地震稳定性的因素很多,只考虑单一因素不足以分析其在地震作用下的稳定性,因此需要综合多种因素对边坡进行分类。本文将综合考虑边坡地质和材料力学性质等因素,对地震作用下的土质边坡进行划分,可为地震作用下土质边坡稳定性评价分析奠定基础。

## 1 划分条件

对土质边坡进行划分,首先要确定划分指标。前人关于地震滑坡影响因素的研究已有很多。例如Keefer(2000)对1989年Loma Prieta地震引发的滑坡进行了调查分析,认为地震引发的滑坡分布主要与震级、震中距、边坡岩性和坡度等因素有关。2008年5月12日汶川 $M_s8.0$ 大地震和2013年芦山 $M_s7.0$ 地震均引发了大量的滑坡灾害(黄润秋等,2008;裴向军,黄润秋,2013)。许多地震触发的滑坡分布的研究(黄润秋,李为乐,2008;许冲等,2009;王秀英等,2009,2010;李果等,2011;崔鹏等,2013;裴向军,黄润秋,2013)表明,地形坡度和高程、水系距离、地震因素、地震断裂、坡体结构和岩性等均应作为边坡地震稳定性的主要控制因素。

通过上述研究分析可以看出,地震诱发滑坡的影响因素主要为地形、水文、岩性和地震参数等4个方面,具体表现为坡度、坡高、斜坡结构类型、降水、水系距离、黏聚力、内摩擦角和地震动参数等8个因素。由于这些影响因素均具有一定的不确定性和模糊性(袁仁茂等,1999;黄润秋,2007),若将所有影响因素作为划分边坡类型的依据,则划分结果势必杂乱,且操作性和实用性不强,因此须计算上述影响因素的权重,选取权重值较大的主导因素作为划分指标。为了更准确、更方便地评价地震作用下土质边坡的稳定性,本文基于以下原则对边坡进行划分:①综合性。影响地震滑坡的因素有多种,结合地质因素和

力学参数,更全面地划分土质边坡类型;② 操作性.将影响因素中的主导因素作为划分依据,以实现实际工程运用中的可操作性和高效性;③ 实用性.在实际工程的基础上进行分类,通过文中得到的土质边坡类型表实现地震作用下边坡稳定性的快速识别、评价和预测.

2 地震作用下边坡稳定性影响因素的权重计算

2.1 层次分析法

层次分析法(analytical hierarchy process, 简称为 AHP),是美国运筹学家 Saaty 和 Wong(1983)于 20 世纪 70 年代提出的一种对复杂的定性问题进行定量描述的简便、灵活而又实用的多目标评价决策方法,该方法把复杂问题中的多个影响因素进行两两比较,而后建立结构模型和数学模型来计算分析各元素的相对重要性次序和影响权重,为无法完全用定量或定性方法解决的问题提供了一种行之有效的策略.近年来层次分析法已被广泛运用于地震滑坡的危险性评估中(樊晓一等, 2004; 李萍, 2006; 陈晓利等, 2008, 2012),并取得了良好的效果.

本文将利用层次分析法,研究地震作用下和非地震作用下影响土质斜坡稳定性的关键因素及其权重计算等问题.

2.2 各影响因素的权重计算

1) 建立递阶层次结构模型.将第一节选取出的坡度、坡高、斜坡结构类型、降水、水系距离、黏聚力、内摩擦角和地震动参数等 8 个因素作为研究对象,建立如图 1 的层次分析结构模型.

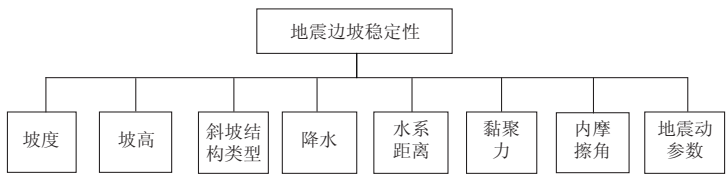


图 1 层次分析结构模型  
Fig. 1 AHP structure model

表 1 判断矩阵的标度及含义  
Table1 Scale and implication of judgment matrix

标度	含义
1	两因素相比,重要性相同
3	两因素相比,一个因素比另一个因素稍微重要
5	两因素相比,一个因素比另一个因素明显重要
7	两因素相比,一个因素比另一个因素强烈重要
9	两因素相比,一个因素比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	上述相邻判断标度的中间值

2) 构造判断矩阵.建立层次分析结构模型后,需要构造判断矩阵,用以对模型第二层(指标层)中各因素对上一层因素的相对重要性进行量化,量化的判断标度及含义如表 1 所示,若因素  $i$  与因素  $j$  的比较值为  $a_{ij}$ ,则因素  $j$  与因素  $i$  的比较值  $a_{ji} = 1/a_{ij}$ .

根据目前对地震滑坡影响因素的认识和相关专家的经验,结合表 1,对指标层中 8 个因素之间的相对重要性进行判断、取值,并将取值结果组成判断矩阵  $\mathbf{A}=(a_{ij})_{8\times 8}$ .

为了度量该判断矩阵  $\mathbf{A}$  的一致性和可信度,需要对判断矩阵进行一致性检验,为此引

入两个指标，即一致性指标 CI 和平均随机一致性指标 RI.

一致性指标 CI 的计算公式为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - m}{m - 1}, \tag{1}$$

式中， $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征根， $m$  为判断矩阵的元素个数，此时  $m=8$ .

平均随机一致性指标 RI，是通过随机构造 500 个判断矩阵  $A_1, A_2, A_3, \cdots, A_{500}$  作为参照对比，分别计算各矩阵对应的一致性指标  $CI_1, CI_2, CI_3, \cdots, CI_{500}$ ，并取其平均数得到平均随机一致性指标：

$$RI = \frac{CI_1 + CI_1 + \cdots + CI_{500}}{500}. \tag{2}$$

1—9 标度下判断矩阵的平均随机一致性指标 RI 值如表 2 所示(Saaty, Wong, 1983).

表 2 判断矩阵的平均随机一致性指标 RI  
Table 2 Average random consistency scale RI of judgment matrix

判断矩阵标度	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当判断矩阵的阶数大于 2 时，其一致性指标 CI 和平均随机一致性指标 RI 的比值称为随机一致性比率，记为  $CR=CI/RI$ . 当  $CR<0.1$  时，判断矩阵才具有较好的一致性，即各因素的相对重要性取值的排序是合理的，否则需要重新排列判断矩阵的取值. 本文通过多次调整取值并试算，最终获得上述 8 个因素的合理的判断矩阵为

$$A = (a_{ij})_{8 \times 8} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & \frac{1}{2} & 4 & 2 & 6 & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & 1 & 3 & \frac{1}{4} & 2 & \frac{1}{2} & 4 & \frac{1}{5} \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 2 & \frac{1}{7} \\ 2 & 4 & 6 & 1 & 5 & 3 & 7 & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & 2 & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{3} & 3 & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{2} & 2 & 4 & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 5 & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{4} & \frac{1}{2} & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{8} \\ 3 & 5 & 7 & 2 & 6 & 4 & 8 & 1 \end{bmatrix},$$

具体结果列于表 3.

计算上述判断矩阵的最大特征值，得到  $\lambda_{\max}=8.2883$ ，由一致性指标计算公式，即式 (1)求得  $CI=(8.2883-8)/(8-1)=0.0412$ ，根据表 2 得到平均随机一致性指标 RI 为 1.41，则随机一致性比率  $CR=0.0412/1.41=0.0292<0.1$ ，说明该判断矩阵具有较好的一致性，各因素的相对重要性排序是合理的.

表 3 地震滑坡影响因素判断矩阵

Table 3 Judgment matrix of seismic landslide influence factors

	黏聚力	降水	斜坡结构类型	坡度	坡高	内摩擦角	水系距离	地震动参数
黏聚力	1	3	5	1/2	4	2	6	1/3
降水	1/3	1	3	1/4	2	1/2	4	1/5
斜坡结构类型	1/5	1/3	1	1/6	1/2	1/4	2	1/7
坡度	2	4	6	1	5	3	7	1/2
坡高	1/4	1/2	2	1/5	1	1/3	3	1/6
内摩擦角	1/2	2	4	1/3	3	1	5	1/4
水系距离	1/6	1/4	1/2	1/7	1/3	1/5	1	1/8
地震动参数	3	5	7	2	6	4	8	1

之后求出与判断矩阵  $\mathbf{A}$  的最大特征根  $\lambda_{\max}=8.2883$  对应的特征向量  $\mathbf{W}=(0.3449, 0.1556, 0.0717, 0.5059, 0.1046, 0.2323, 0.0517, 0.7267)$ , 并对其进行归一化处理, 得到的向量  $\mathbf{W}'=(0.1572, 0.0709, 0.0327, 0.2306, 0.0477, 0.1059, 0.0236, 0.3313)$  即为各影响因素的权重值(表 4). 由表 4 可知, 对土质边坡稳定性影响最大的因素为地震动参数, 之后依次为坡度、黏聚力、内摩擦角、降水、坡高、结构类型和水系距离.

表 4 地震作用下土质边坡稳定性影响因素的权重

Table 4 Weight of each influence factor of soil slop stability under seismic action

影响因素	黏聚力	降水	斜坡结构类型	坡度	坡高	内摩擦角	水系距离	地震动参数
权重值	0.1572	0.0709	0.0327	0.2306	0.0477	0.1059	0.0236	0.3313

根据计算得到的各因素的权重值, 本文选取权重值较大的前 4 个因素, 即地震动参数、坡度、黏聚力和内摩擦角作为划分土质边坡类型的指标.

3 非地震作用下边坡稳定性影响因素的权重计算

在不考虑地震作用的情况下, 利用层次分析法计算坡度、坡高、斜坡结构类型、降水、水系距离、黏聚力和内摩擦角等 7 个影响因素的权重. 根据各影响因素相互作用的大小作多次取值调整并试算, 最终获得合理的判断矩阵为

$$\mathbf{A} = (a_{ij})_{7 \times 7} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 5 & \frac{1}{2} & 4 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 7 & 2 & 6 & 4 & 5 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 & \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} \\ 2 & \frac{1}{2} & 6 & 1 & 5 & 3 & 4 \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{6} & 2 & \frac{1}{5} & 1 & \frac{1}{3} & \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & 4 & \frac{1}{3} & 3 & 1 & 2 \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{5} & 3 & \frac{1}{4} & 2 & \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix},$$

具体结果列于表 5.

表 5 诱发滑坡的影响因素判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of induced landslide influence factors

影响因素	黏聚力	降水	坡高	坡度	水系距离	斜坡结构类型	内摩擦角
黏聚力	1	1/3	5	1/2	4	2	3
降水	3	1	7	2	6	4	5
坡高	1/5	1/7	1	1/6	1/2	1/4	1/3
坡度	2	1/2	6	1	5	3	4
水系距离	1/4	1/6	2	1/5	1	1/3	1/2
斜坡结构类型	1/2	1/4	4	1/3	3	1	2
内摩擦角	1/3	1/5	3	1/4	2	1/2	1

计算上述判断矩阵的最大特征值，得到  $\lambda_{\max}=7.1955$ ，对于 7 阶矩阵， $m=7$ ，则由一致性指标计算公式求得  $CI=(7.1955-7)/(7-1)=0.0326$ ，根据表 2 得到平均随机一致性指标 RI 为 1.32，则随机一致性比率  $CR=0.0326/1.32=0.0247<0.1$ ，说明该判断矩阵具有较好的一致性，各因素的相对重要性排序是合理的。

之后进一步求得判断矩阵 **A** 的最大特征根  $\lambda_{\max}=7.1955$  所对应的特征向量 **W** = (−0.3333, −0.7444, −0.0655, −0.5041, −0.0941, −0.2177, −0.1420)，并对其归一化处理，得到向量 **W'** = (0.1586, 0.3543, 0.0312, 0.2399, 0.0448, 0.1036, 0.0676)，即为各影响因素的权重值(表 6)。

表 6 非地震作用下土质边坡稳定性影响因素的权重

Table 6 Weight of each influence factor of soil slop stability under non-seismic action

影响因素	黏聚力	降水	坡高	坡度	水系距离	斜坡结构类型	内摩擦角
权重值	0.1586	0.3543	0.0312	0.2399	0.0448	0.1036	0.0676

根据计算得到的各因素权重值，对比分析表 4 与表 6 可知，边坡稳定性的影响因素在有无地震作用下所得的权重是有所差别的。在非地震作用下，降水对土质边坡稳定性的影响最大，之后依次为坡度、黏聚力、斜坡结构类型、内摩擦角、水系距离和坡高；与地震作用下各影响因素的权重相比，降水、斜坡结构类型和水系距离的影响权重显著增大。相关统计显示，自 20 世纪 80 年代以来发生在我国大陆范围内的滑坡灾害，约一半是由降雨引发的(黄润秋，2007)，这也很好地印证了本文的结论。

4 土质边坡类型

4.1 坡体材料性质

土质边坡材料具有多样性，而不同土质的力学性质不同，在地震作用下表现出的稳定性亦不同。根据土体的工程分类(刘祖典，1997；唐大雄等，1999；孔宪立，石振明，2001；姜德义，王国栋，2003；李萍，2006；《工程地质手册》编委会，2011)，将土质边坡材料的内摩擦角和黏聚力划分为以下 4 段：

1) 内摩擦角介于 15°—24°，黏聚力介于 30—65 kPa。典型代表为黏土边坡。以黏性土为主的边坡称为黏土边坡。黏土以细密颗粒为主，含有较多黏粒和亲水性黏土矿物，是修筑堤坝的常用土料。但由于黏土的生成时间及空间环境的差异，其物理力学特性等也有较

大的差别,对边坡稳定性的影响也不同.尤其是稠度,如固态或者硬塑态的黏土,抗剪强度较高,其组成的边坡一般具有较好的稳定性.

2) 内摩擦角介于  $40^{\circ}$ — $76^{\circ}$ ,黏聚力介于 20—33 kPa. 典型代表为黄土边坡. 黄土,顾名思义,是颜色呈黄色的土,天然状态下含水量较少,对湿度变化很敏感. 黄土边坡在我国分布较广,甘、陕、晋地区尤为常见,宁夏、河北和河南等部分地区也有分布. 在地震和降雨的作用下,黄土边坡极易发生失稳破坏,造成严重的人员伤亡与经济损失.

3) 内摩擦角小于  $15^{\circ}$ ,黏聚力小于 20 kPa. 典型代表为软土边坡. 软土边坡是指坡体主要由淤化、泥变、淤泥实土及其它抗剪强度极低的土组成的边坡. 软土边坡主要分布于我国东海、黄海、渤海和南海等沿海地区,内陆地区也有少量分布,这类土体的抗剪强度较低.

4) 内摩擦角介于  $24^{\circ}$ — $42^{\circ}$ ,黏聚力近似为零. 典型代表为砂土边坡. 砂土边坡是指主要由砂或砂性土组成的边坡. 砂土的特性与砂粒的大小和密度有关. 一般情况下,砂土的透水性较强. 因砂土中黏粒含量很少,其黏聚力也很小,几乎为零. 在地震作用下,砂土边坡多易产生液化而导致滑坡.

4.2 边坡坡度

坡度是反映边坡面倾斜程度的一个物理量,坡度对滑坡的发育具有重要的影响(樊晓

表 7 边坡坡度等级类型  
Table 7 Slope gradient type

等级	边坡名称	坡度/ $^{\circ}$
I	缓坡	$<20$
II	缓陡坡	20—35
III	陡坡	35—50
IV	急坡	$>50$

一等, 2004). 边坡坡度决定了坡体有效临空面的大小,而有效临空面又为滑坡的发生提供了必要的空间条件. 在地震作用下,滑坡等级的分布规律有所不同,但是大量研究统计显示,地震滑坡多发生在  $20^{\circ}$ — $50^{\circ}$  的坡度范围内(孙崇绍,蔡红卫,1997;黄润秋,2007;许冲等,2009). 本文参考姜德义和王国栋(2003)一文,将坡度划分为 4 个等级,详见表 7.

4.3 土质边坡类型划分

由于地震动参数的影响因素较多,使得探讨变得较为复杂且不具操作性. 作者此前已对地震动参数的土质边坡响应特性进行过讨论(张江伟,2015),研究结果表明,地震动的峰值加速度、频谱和持时对地震边坡稳定性均有不同程度的影响,其中峰值加速度和频谱的影响较为显著. 地震动中幅值、频谱和持时的不同组合对边坡稳定性的影响程度也不同. 本文考虑的地震作用主要体现在影响因素的选取,比如降水等因素在非地震作用下对边坡稳定性的影响作用显著,但在地震作用下则相反. 根据地震作用下边坡影响因素及其权重的研究结果可知,以坡度、黏聚力和内摩擦角这 3 个指标进行土质边坡分类比较合适,其分类结果见表 8. 首先将土质边坡按照土体的内摩擦角和黏聚力划分为 4 个大类,然后

表 8 土质边坡分类  
Table 8 Soil slope classification

类型	内摩擦角/ $^{\circ}$	黏聚力/kPa	坡度				参考材料
			缓坡/ $^{\circ}$	缓陡坡/ $^{\circ}$	陡坡/ $^{\circ}$	急坡/ $^{\circ}$	
I	15—24	30—65	$<20$	20—35	35—50	$>50$	黏土
II	40—76	20—33	$<20$	20—35	35—50	$>50$	黄土
III	$<15$	$<20$	$<20$	20—35	35—50	$>50$	软土
IV	24—42	$\approx 0$	$<20$	20—35	35—50		砂土

根据坡度等级将土质边坡进一步细分。

## 5 讨论与结论

影响土质边坡地震稳定性的因素有很多,在研究时需要对其进行筛选,利用主导因素来研究土质边坡的地震稳定性,这样更具操作性和效率性。本文在对地震作用下土质边坡类型研究分析的过程中,得到以下几点结论:

1) 通过对边坡地震稳定性影响因素的研究分析,认为影响地震诱发滑坡的主要因素涉及地形、水文、岩性和地震参数等 4 个方面,具体表现为坡度、坡高、斜坡结构类型、降水、水系距离、黏聚力、内摩擦角和地震动参数等 8 个主要因素。

2) 利用层次分析法对上述 8 个影响因素建立的层次结构模型进行分析计算,得到各因素在有、无地震作用下土质边坡稳定性的影响权重。结果表明:在地震作用下,影响土坡稳定性的主要因素为地震动参数,之后依次为坡度、黏聚力、内摩擦角、降水、坡高、斜坡结构类型和水系距离;非地震作用下,降水对土质边坡稳定性的影响作用最大,之后依次为坡度、黏聚力、斜坡结构类型、内摩擦角、水系距离和坡高。

3) 以地震作用下影响权重较高的坡度、黏聚力和内摩擦角等 3 个因素为指标,建立地震作用下土质边坡类型的划分方案,将土质边坡划分为 4 类,每个类型中又根据坡度的不同划分为缓坡、缓陡坡、陡坡和急坡等 4 个亚类。

本文的划分结果可为土坡地震稳定性的数值模拟分析及危险性评价提供基础和依据。值得注意的是,对于上述各类型土坡的易滑性有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- 陈晓利,祁生文,叶洪. 2008. 基于 GIS 的地震滑坡危险性的模糊综合评价研究[J]. 北京大学学报:自然科学版, 44(3): 434-438.
- Chen X L, Qi S W, Ye H. 2008. Fuzzy comprehensive study on seismic landslide hazard based on GIS[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 44(3): 434-438 (in Chinese).
- 陈晓利,冉洪流,王明明. 2012. 潜在地震滑坡危险区区划方法[J]. 地球物理学报, 55(4): 1269-1277.
- Chen X L, Ran H L, Wang M M. 2012. Hazards zonation for potential earthquake-induced landslide area[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(4): 1269-1277 (in Chinese).
- 崔鹏,陈晓清,张建强,杨宗佶,游勇,范建容,苏凤环,孔应德,朱兴华. 2013. “4·20”芦山 7.0 级地震次生山地灾害活动特征与趋势[J]. 山地学报, 31(3): 257-265.
- Cui P, Chen X Q, Zhang J Q, Yang Z J, You Y, Fan J R, Su F H, Kong Y D, Zhu X H. 2013. Activities and tendency of mountain hazards induced by the  $M_s 7.0$  Lushan earthquake, April 20, 2013[J]. *Journal of Mountain Science*, 31(3): 257-265 (in Chinese).
- 樊晓一,乔建平,陈永波. 2004. 层次分析法在典型滑坡危险度评价中的应用[J]. 自然灾害学报, 13(1): 72-76.
- Fan X Y, Qiao J P, Chen Y B. 2004. Application of analytic hierarchy process in assessment of typical landslide danger degree[J]. *Journal of Natural Disasters*, 13(1): 72-76 (in Chinese).
- 《工程地质手册》编委会. 2011. 工程地质手册[M]. 第四版. 北京: 中国建筑工业出版社: 5-12.
- Editorial Board of *Engineering Geology Manual*. 2011. *Engineering Geology Manual*[M]. 4th edition. Beijing: China Architecture and Building Press: 5-12 (in Chinese).
- 黄润秋. 2007. 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, 26(3): 433-454.
- Huang R Q. 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433-454 (in Chinese).



- 黄润秋, 李为乐. 2008. “5·12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, **27**(12): 2585–2592.
- Huang R Q, Li W L. 2008. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **27**(12): 2585–2592 (in Chinese).
- 黄润秋, 裴向军, 李天斌. 2008. 汶川地震触发大光包巨型滑坡基本特征及形成机理分析[J]. 工程地质学报, **16**(6): 730–741.
- Huang R Q, Pei X J, Li T B. 2008. Basic characteristics and formation mechanism of the largest scale landslide at Daguangbao occurred during the Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, **16**(6): 730–741 (in Chinese).
- 姜德义, 王国栋. 2003. 高速公路工程边坡的工程地质分类[J]. 重庆大学学报, **26**(11): 113–116.
- Jiang D Y, Wang G D. 2003. Engineering geologic classification of slopes for highway projects[J]. *Journal of Chongqing University*, **26**(11): 113–116 (in Chinese).
- 孔宪立, 石振明. 2001. 工程地质学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社: 10–41.
- Kong X L, Shi Z M. 2001. *Engineering Geology*[M]. Beijing: China Architecture and Building Press: 10–41 (in Chinese).
- 李果, 黄润秋, 巨能攀, 赵建军. 2011. 软弱基座型滑坡震裂机理研究[J]. 工程地质学报, **19**(5): 712–718.
- Li G, Huang R Q, Ju N P, Zhao J J. 2011. Earthquake cracking mechanism of landslide with soft foundation[J]. *Journal of Engineering Geology*, **19**(5): 712–718 (in Chinese).
- 李萍. 2006. 黄土边坡可靠性研究[D]. 西安: 长安大学: 18–33.
- Li P. 2006. *Reliability Applied to Stability Analysis of Loess Slope*[D]. Xi'an: Chang'an University: 18–33 (in Chinese).
- 刘祖典. 1997. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社: 26–29.
- Liu Z D. 1997. *The Loess Mechanics and Engineering*[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press: 26–29 (in Chinese).
- 裴向军, 黄润秋. 2013. “4·20”芦山地震地质灾害特征分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, **40**(3): 257–263.
- Pei X J, Huang R Q. 2013. Analysis of characteristics of geological hazards by “4·20” Lushan earthquake in Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, **40**(3): 257–263 (in Chinese).
- 孙崇绍, 蔡红卫. 1997. 我国历史地震时滑坡崩塌的发育及分布特征[J]. 自然灾害学报, **6**(1): 25–30.
- Sun C S, Cai H W. 1997. Developing and distributing characteristics of collapses and landslides during strong historic earthquake in China[J]. *Journal of Natural Disasters*, **6**(1): 25–30 (in Chinese).
- 孙玉科, 徐义芳. 1959. 稳定边坡的概念及自然边坡的分类[J]. 地质科学, **2**(7): 214–215.
- Sun Y K, Xu Y F. 1959. Concept of stable slope and classification of natural slope[J]. *Chinese Journal of Geology*, **2**(7): 214–215 (in Chinese).
- 唐大雄, 刘佑荣, 张文殊, 王清. 1999. 工程岩土学[M]. 第二版. 北京: 地质出版社: 86–99.
- Tang D X, Liu Y R, Zhang W S, Wang Q. 1999. *Science of Geotechnical Engineering*[M]. 2nd edition. Beijing: Geological Publishing House: 86–99 (in Chinese).
- 王秀英, 聂高众, 王登伟. 2009. 利用强震记录分析汶川地震诱发滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, **28**(11): 2369–2376.
- Wang X Y, Nie G Z, Wang D W. 2009. Analysis of landslide induced by Wenchuan earthquake by strong motion records [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **28**(11): 2369–2376 (in Chinese).
- 王秀英, 聂高众, 王登伟. 2010. 汶川地震诱发滑坡与地震动峰值加速度对应关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, **29**(1): 82–89.
- Wang X Y, Nie G Z, Wang D W. 2010. Research on relationship between landslides and peak ground accelerations induced by Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **29**(1): 82–89 (in Chinese).

- 许冲, 戴福初, 姚鑫, 陈剑, 涂新斌, 孙瑜, 王志一. 2009. GIS支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J]. 岩石力学与工程学报, **28**(增刊2): 3978–3985.
- Xu C, Dai F C, Yao X, Chen J, Tu X B, Sun Y, Wang Z Y. 2009. GIS-based landslide susceptibility assessment using analytical hierarchy process in Wenchuan earthquake region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **28**(Suppl 2): 3978–3985 (in Chinese).
- 袁仁茂, 李树德, 陈锁忠. 1999. 镇江市滑坡规律研究及其发生原因探析[J]. 水土保持研究, **6**(4): 95–99.
- Yuan R M, Li S D, Chen S Z. 1999. Study of distribution laws and genesis of landslides in Zhenjiang city[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, **6**(4): 95–99 (in Chinese).
- 张江伟. 2015. 土质边坡地震动力响应特性分析及稳定性评价[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所: 31–39.
- Zhang J W. 2015. *Seismic Dynamic Response Analysis and Stability Evaluation of Soil Slope*[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 31–39 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2014. GB 50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 13–18.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. 2014. GB 50330–2013; *Technical Code for Building Slope Engineering*[S]. Beijing: China Architecture and Building Press: 13–18 (in Chinese).
- Bieniawski Z T. 1974. Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelin[C]// *Proceedings of the Third International Congress on Rock Mechanics*. Denver: International Society for Rock Mechanics: 27–32.
- Deere D U, Hendron A J, Patton F D, Cording E J. 1967. Design of surface and near-surface construction in rock[C]// *Proceedings of the 8th U. S. Symposium on Rock Mechanics*. Minneapolis, Minnesota: American Rock Mechanics Association: 237–302.
- Keefer D K. 2000. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution: The 1989 Loma Prieta, California event[J]. *Eng Geol*, **58**(3/4): 231–249.
- Saaty T L, Wong M M. 1983. Projecting average family size in rural India by the analytic hierarchy process[J]. *J Math Sociol*, **9**(3): 181–209.