

曾金艳, 陈文, 扈桂让, 庄明芳, 2015. 数值模拟在地震小区划滑坡灾害评价中的应用. 震灾防御技术, 10 (2): 335—343.
doi: 10.11899/zzfy20150213

数值模拟在地震小区划滑坡 灾害评价中的应用

曾金艳^{1, 2)} 陈文³⁾ 扈桂让^{1, 2)} 庄明芳^{1, 2)}

1) 山西省地震局, 太原 030002

2) 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 太原 030025

3) 北京美辰建筑抗震工程有限公司, 北京 100027

摘要 工程场地地震安全性评价、特别是在地震小区划工作中, 对地震滑坡的评价通常采用定性分析方法, 因此, 对其影响范围未给出定量的评价结果。本文以吕梁新城地震小区划滑坡评价为例, 通过对该区的地质条件、地貌特征的研究, 针对具有典型特征的剖面, 选取地震力、内聚力、摩擦角作为影响因子, 采用离散单元法 (DEM) 对潜在滑坡体的稳定性进行了数值模拟计算, 得到了可能失稳的滑坡体潜在滑动的影响范围。并在此基础上通过对已知滑坡与潜在滑坡剖面结构特征的类比, 对整个研究区内滑坡体的影响范围进行了评价。研究结果可为吕梁新城的规划提供依据, 也可为同类工程中地震滑坡灾害的定量评价提供参考。

关键词: 地震小区划 滑坡 定量分析 类比法

引言

地震发生时滑坡是黄土丘陵区的一种主要次生灾害, 往往会给人民的生命财产带来巨大的损失。如何避免滑坡造成的危害是地震灾害防御的一项重要工作, 也是在工程项目可行性研究阶段的一项不可或缺的评价内容。在现行的评价工作中, 对边坡稳定性分析主要遵循以定性分析为主、定量计算为辅的综合性评价原则 (中华人民共和国国家标准, 2002)。边坡的稳定性分析更多的是考虑自然条件, 如水文地质、工程地质、岩体结构特征等因素, 并没有考虑边坡在地震力作用下的稳定性。在地震力作用影响下滑坡评价方法非常复杂, 目前并无成熟和系统的方法。而在实际评价工作中一般是根据收集、调查和勘测的资料, 结合已有的历史资料与历史记录, 采用理论计算或经验方法进行判定 (中华人民共和国国家标准, 2006)。其中更多的是只对滑坡发生的可能性进行讨论, 而对滑坡的影响范围并未做出具体的评判 (李自红等, 2013; 2012)。

本文以吕梁市新城作为研究区, 通过对研究区地质条件、地貌特征的研究, 定量分析地

[收稿日期] 2014-04-28

[作者简介] 曾金艳, 女, 生于 1970 年。1993 年毕业于中南工业大学地质系, 2011 年取得太原理工大学研究生学历, 高级工程师。主要从事工程物探、工程地震等相关方面的研究。E-mail: chenwen-yan@163.com

震力（以地震加速度表示）对潜在滑坡体稳定性的影响（潜在滑坡体是否失稳以及失稳滑动产生的范围），旨在为研究区内工程项目选址提供依据，同时为同类工程中滑坡的地震地质灾害定量评价提供参考。

1 研究区的地震地质概况

1.1 地形地貌特征

研究区位于吕梁市现有城区北部，构造上属于吕梁山断块隆起区，该区在间歇性抬升的新构造运动中多发育“V”形谷。区内东部和西部为中、低山丘陵，中部为北川河谷地。地形总体呈东、西两面高，中间低的特征。东、西山区地形切割严重，沟谷发育，斜坡坡度较陡；中部河谷深切，各支流两侧及黄土沟壑边坡部陡峻。这些特殊的地形地貌使得研究区内东、西两侧容易发生滑坡灾害。

1.2 地层岩性

研究区内东、西两侧斜坡地带出露的地层岩性多以粉土、粉质粘土为主。其中粉质粘土呈硬塑-坚硬状态；粉土覆盖于粉质粘土之上，土质单一，垂直节理发育，具有孔隙，湿陷性较大，呈水平层状分布，厚度 5—10m。区域内的土体易沿粉土和粉质粘土界面、节理裂隙面产生滑动。

1.3 地震活动

地震是诱发地质灾害的主要动力因素之一。研究区属吕梁山断块隆起区，地震烈度属弱震区，但在场地东南历史上曾发生过 1829 年离石 5½ 级地震，对研究区的影响烈度为Ⅶ度。根据“吕梁市新城地震小区划”（山西省地震工程勘察研究院，2013）给出的地震小区划，研究区 50 年超越概率 10% 的地震峰值加速度为 130gal，属于 0.10g 区，地震基本烈度为Ⅶ度。

2 评价方法简介

评价方法采用离散单元法（DEM），它是由美国的 Cundall 于 1971 年提出的一种岩石力学计算方法（王泳嘉等，1991）。其理论基础为牛顿第二定律，运动方程为：

$$m \frac{d^2 u}{dt^2}(t) + c \frac{du}{dt} + ku(t) = f(t) \quad (1)$$

式中， m 为单元体的质量； u 为位移； t 为时间； c 为粘性阻尼； k 为刚度系数； f 为单元体所受的外荷载。

该方法认为，单元体介质是由不同的多边形刚性块体组成，块体之间呈角-角接触、角-边接触、边-边接触（王卫华等，2005），块体之间的运动通过迭合、滑动、分离来实现。当块体所受的作用力和边界约束条件发生改变时，块体之间会产生作用力，根据这个作用力可以求出块体的加速度、速度和位移。这样各块体之间的空间状态会发生新的变化，块体之间产生新的位移。由于位移矢量差的存在（刘凯欣等，2003），根据力-位移间的关系，又可以得出块体之间新的作用力，然后求出新的加速度、速度和位移。如此反复迭代，直至整个系统的作用力、位移达到平衡状态，从而将岩体的运动状态过程模拟出来。

离散单元法（DEM）的基本特点是允许有限位移和各离散块体发生平动、转动、甚至相互分离，弥补了有限元法或边界元法对介质连续和小变形的限制。对于具有节理结构的块裂

介质的不连续变形及破坏问题的分析具有优势。该方法不但可以考虑块体之间接触面的滑移、分离和倾倒等大变形，还可计算岩体内的变形和应力分布，可以很好地求解非线性大位移和动力稳定性问题（周先齐等，2008）。离散元的二维数值程序，可以模拟地震波在岩体中的传播规律，而且在计算过程中可以自动判别块体之间可能出现的新的接触关系。因此，该方法可以很好地用来模拟地震力作用下边坡节理化岩体渐进破坏以及失稳后的运动过程。

国内外学者利用离散单元法在很多方面进行过研究，如：非连续大位移变形的山体滑坡研究、大坝滑坡体的稳定性研究、黄土坡滑坡与深部地质环境的关系研究等，特别是在边坡稳定性分析中得到了广泛的运用（焦玉勇等，2001）。

通过选取一定数量的剖面进行模拟计算，可以得到每个剖面处滑坡体的影响范围，同时通过分析研究区内其他区段边坡的地层、地形分布特征，采用类比法可综合给出整个研究区滑坡灾害的影响范围。

3 计算剖面 and 参数的选择

3.1 剖面的选择

研究区大致呈南北走向，东西长约 16km，两侧紧邻山区，南北最宽处约 2.5km。东西两侧普遍存在较陡斜坡，沿线地形、地层分布相似，部分区域前缘由于沟岸侵蚀或人工开挖形成临空面。通过野外地质调查，研究区内共存在潜在滑坡体 40 处，各坡体的坡高范围 70—180m，坡角范围 30—80°。由于潜在滑坡体多，如对每处剖面都进行分析，那么计算工作量将非常庞大，为此本文选取典型的剖面进行分析。典型剖面的选取原则为：①考虑研究区内所有不同的坡度、不同坡高的边坡；②在边坡坡体高差相差 10m、坡角相差 5°的范围内选取一个典型剖面；③计算剖面在研究区内尽可能均匀分布。

根据以上原则在研究区范围选取控制剖面 23 条（见图 1）。这些剖面基本上能反映区内的所有边坡情况。

3.2 模型建立和参数确定

（1）滑坡影响因子的选择

形成地震滑坡的因素很多，包括地形地貌、地层岩性、地下水、植被条件以及外部动力（如降水、人为因素、地震力）等。笔者对滑坡灾害影响因子的选择，参考了长安大学对黄土崩塌、滑坡研究的成果。如：谷天峰等（2006）选取土的粘聚力 c 、土的内摩擦角 φ 、坡度、坡高、地震地面运动最大加速度、斜坡结构类型，对甘肃黑方台滑坡进行了评价（单体滑坡）；王亚强等（2004）选取地震动峰值加速度、地貌、地层、坡度、天然密度，对黄土高原地震滑坡进行了评价。从以上评价的经验得知，在黄土高原地区进行地震滑坡、崩塌评价时应考虑地震力、地层、坡度等因素是可行的（王兰民等，2003）。

本文在搜集了研究区内大量的勘察资料的基础上，根据具体的地质条件，并结合选取的坡度、高程（后缘至剪出口高差）、内聚力 c 、内摩擦角 φ 、地震力等参数，采用合适的因子容量，重点突出地震力诱发滑坡的主导因子作用，对边坡的稳定性进行了分析计算。

（2）岩体力学参数的选取

模拟计算所采用的岩体力学参数包括：密度、内聚力 c 、内摩擦角 φ 值、体积模量、剪切模量。其中密度、 c 、 φ 值采用现场采集土样测试结果，体积模量、剪切模量来自山西省吕梁地区经验值，具体数值如表 1 所示。

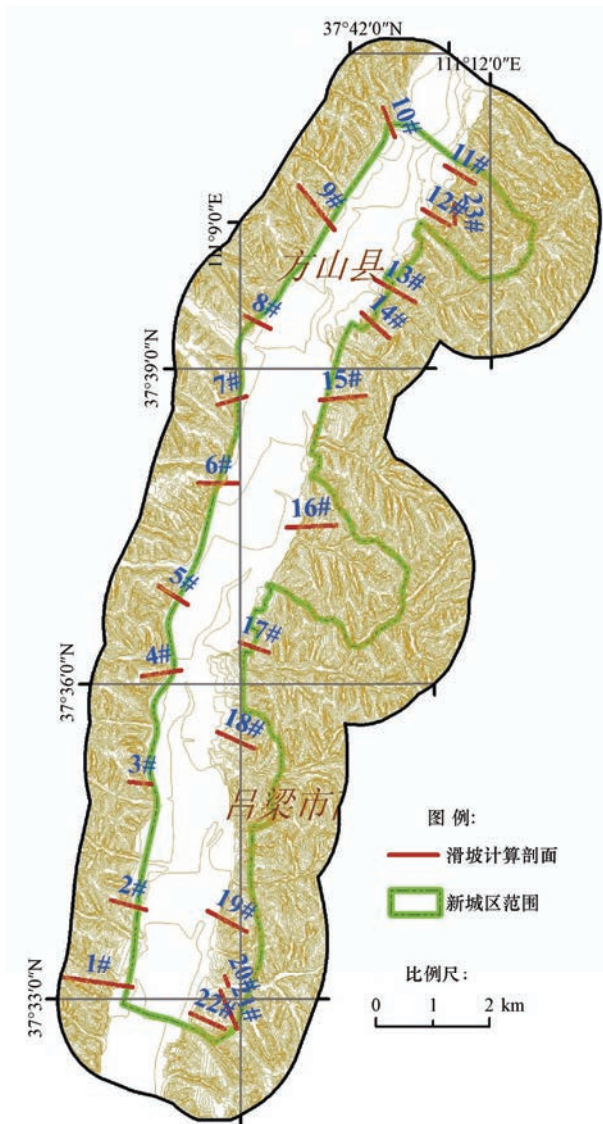


图1 计算剖面分布图

Fig.1 Map of calculation profile

(3) 边界条件

数值模拟计算边界选取原则为：左右侧取自由场边界，底边界垂直向位移约束并为黏滞边界，这样可以减少地震波的反射而损失能量，地震动力荷载加在斜坡底部边界上。

表1 数值模拟岩体物理力学参数

Table 1 Physical parameters of rock in numerical simulation

密度 (g/cm^3)	体积模量 (MPa)	剪切模量 (MPa)	内聚力 (KPa)	内摩擦角 ($^\circ$)
1.79	8.33	3.55	40.6	22.7

(4) 输入地震力

笔者主要考虑水平地震力的作用，选取 50 年超越概率 10% 对应的地震强度作为诱发滑坡地震力的输入。由于水平加速度时程曲线表示的动力荷载不能直接加在黏滞边界上，输入的应力曲线通过以下方法获得：根据 50 年超越概率 10% 的水平加速度反应谱合成水平加速度时程（图 2）；再利用 Seismosignal 软件对加速度时程曲线进行基线与滤波校正；在此基础上利用数值积分的方法转化为速度时程曲线（图 2），再将速度曲线转化为应力曲线，然后加在底部边界上。

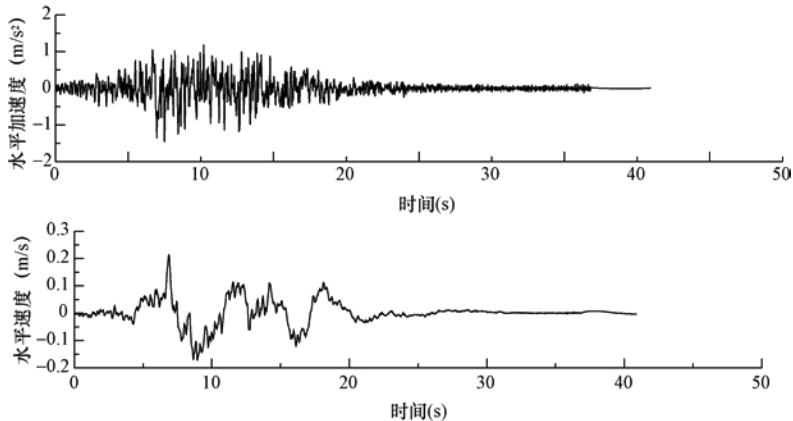


图 2 水平加速度时程曲线与速度时程曲线（50a 10%）

Fig. 2 Horizontal acceleration time history and velocity time history (50a 10%)

4 计算结果分析

4.1 安全系数的选取原则

考虑到不稳定斜坡致灾的重要性及危害性，取一定的安全系数作为边坡稳定性的评价标准。安全系数的选择按《滑坡防治工程设计与施工技术规范（DZ/T0219-2006）》取值（中华人民共和国地质矿产行业标准，2006）。根据单个滑坡体产生失稳时受灾程度少于 500 人的一般集镇、县级中型工矿企业等因素，确定滑坡防治工程的级别为Ⅲ级，综合滑坡防治工程设计安全系数推荐表中防治工况取Ⅳ类（地震工况下），对应的安全系数取 $K_s=1.05$ 。当计算潜在滑坡体最小安全系数大于该值时，则潜在滑坡体为稳定，否则为失稳坡体，此时计算坡体失稳时产生的滑移量。

4.2 剖面计算结果分析

在研究区范围内参与计算的剖面有 23 条。由于篇幅所限，笔者取比较典型的“04 剖面”在遭遇地震力的作用下，计算出的滑坡体的稳定性结果进行分析。

“04 剖面”位于西属巴中学西侧，地貌上属黄土丘陵边缘，坡体高度约 120m，坡角约 60°，地层主要为马兰黄土。沿边坡发育小型冲沟，边坡上呈现 1—2m 台阶状黄土坎，如图 3 所示。

用上述方法进行计算，在 50 年超越概率为 10% ($A_{max}=130\text{gal}$) 水平地震荷载工况下，该坡体最小安全系数为 1.019，小于安全系数 $K_s=1.05$ ，因此处于不稳定状态。其应变等值线如图 4 所示，从图中可以看出，坡体（特别是坡脚部位）由内向外，应变逐渐增加，并集中于坡脚部位，这与滑坡剪出口部位相吻合。在这种状况下坡体将会失稳下滑，经模拟计算前缘滑距可达 86.01m，如图 5 所示。



图3 “04剖面”坡体剖面图

Fig. 3 The slope section of “04” profile

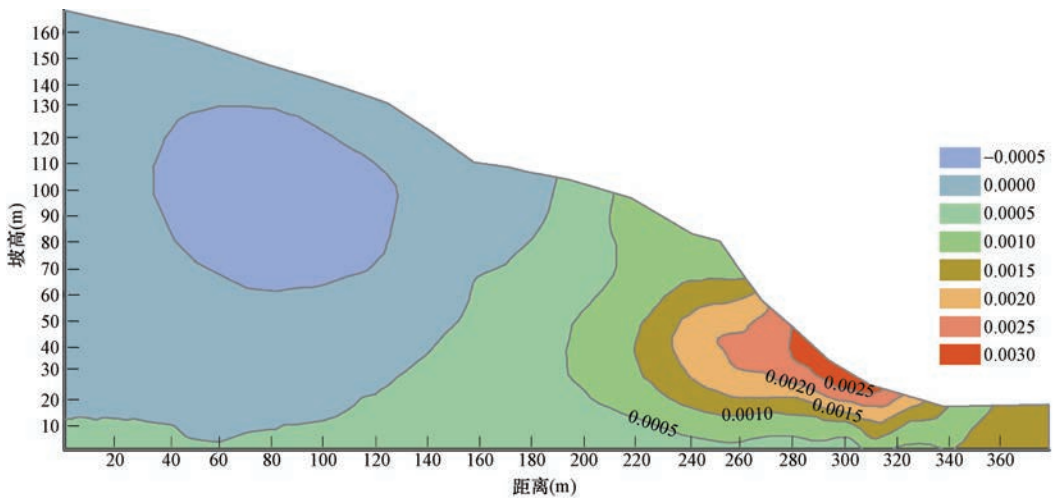


图4 地震荷载条件下坡体应变等值线图 (50a 10%)

Fig. 4 Strain contour map of the slope under seismic load condition

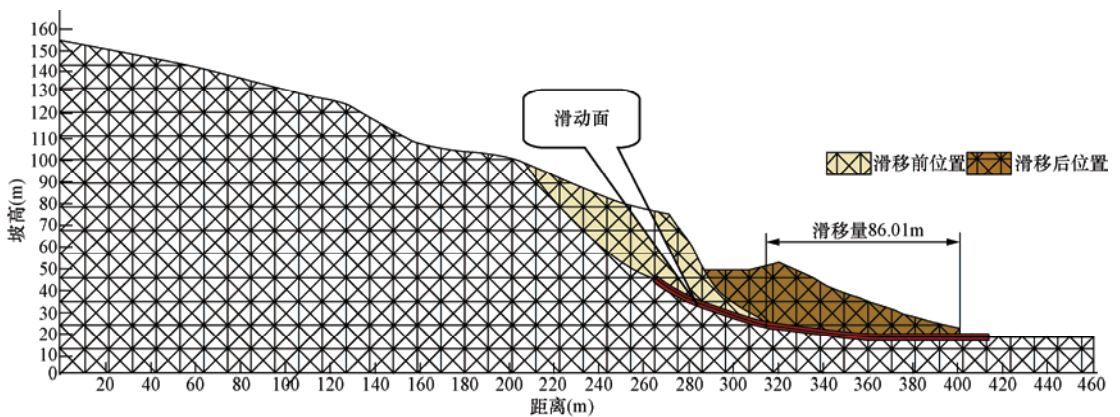


图5 剖面滑移模拟图 (50a 10%)

Fig. 5 Simulation diagram showing slip movement in section

4.3 研究区滑坡影响范围的确定

研究区内 23 个剖面的计算结果如表 2 所示。

表 2 滑坡体前缘滑动距离汇总表

Table 2 Summary of the sliding distance at the front edge of the landslide

剖面编号	坡高 (m)	坡角 (°)	安全系数	评价结果 (滑动距离/m)	剖面编号	坡高 (m)	坡角 (°)	安全系数	评价结果 (滑动距离/m)
01	153	30	>1.486	稳定	13	150	25	>2.231	稳定
02	100	35	>1.303	稳定	14	145	20	>1.514	稳定
03	90	60	0.792	168.52	15	180	18	>1.628	稳定
04	100	60	1.019	86.01	16	140	45	>1.175	稳定
05	80	70	1.087	46.20	17	120	30	>1.685	稳定
06	85	65	0.756	77.43	18	100	15	>2.209	稳定
07	70	73	0.882	94.07	19	180	30	>1.193	稳定
08	70	30	>1.169	稳定	20	55	80	0.580	60.46
09	80	35	>1.792	稳定	21	120	15	>1.542	稳定
10	100	40	>1.341	稳定	22	50	53	1.096	稳定
11	144	30	>1.328	稳定	23	150	30	0.930	72.08
12	158	40	>1.131	稳定					

从表 2 可以看出，在研究区内坡体的稳定性取决于坡角，坡角越大，坡体越不稳定。坡体失稳时前缘的滑动距离与坡角和坡高有关。因此笔者根据区域内潜在滑坡体的坡角、高度、岩层分布，将评价区范围内潜在滑坡体与参与计算的典型滑坡剖面进行了类比，视具有相似地形和地层特点的滑坡体具有相似的失稳特征，并根据这一原则将研究区范围内的各潜在滑坡体在地震力 $A_{\max}=130\text{gal}$ (50a 10%) 作用下的影响范围综合界定，得到了评价区域范围内地震滑坡灾害的影响范围，如图 6 所示。

5 结语

(1) 采用数值模拟方法可以完成崩塌、滑坡评价中的定量分析，可为工程项目的规划选址提供较精确的数据，为更合理地利用土地资源提供有利的参考依据。

(2) 当研究区段涉及的范围较大时，在进行滑坡灾害定量评价时，可选取具有典型的剖面进行模拟计算。典型剖面的选择可考虑研究区内的地貌、地层特征，选取剖面应代表区内的不同情况。在此条件下可以采用类比法，得出研究区内所有潜在滑坡体在地震力作用下的滑动特征。

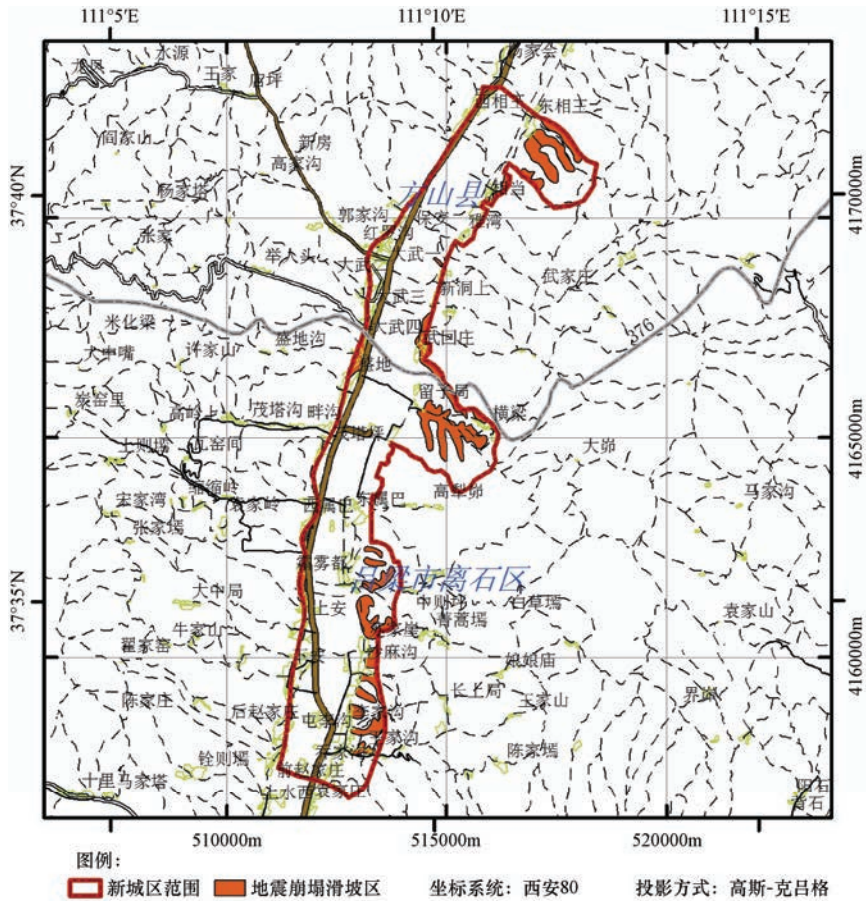


图6 研究区内地震滑坡的影响范围

Fig. 6 Effected range of earthquake induced landslide zones

(3) 离散单元法 (DEM) 作为一种日趋成熟的数值模拟方法, 在理论上还存在一些不足, 如方法中的法向、切向刚度是人为假设的, 节理也是统计分析得出的, 由此得到的模拟结果与实际情况有所偏差。在以后的实践中应进一步加强模拟分析结果与实验结果的对比, 从而找出该方法的不足, 并有针对性地改进。

参考文献

- 谷天峰, 王家鼎, 2006. 均质土体滑坡运动规律分析. 西北大学学报 (自然科学版), **36** (3): 437—441.
- 焦玉勇, 葛修润, 2001. 基于静态松弛法求解三维离散单元法. 岩石力学与工程学报, **19** (4): 453—458.
- 刘凯欣, 高凌天, 2003. 离散单元法研究的评述. 力学进展, **33** (4): 483—490.
- 李自红, 刘鸿福, 安卫平, 2013. 地震监测台网在矿山地震灾害评估中的应用. 煤矿安全, **44** (1): 144—146.
- 李自红, 刘鸿福, 曾金艳等, 2012. 基于分形理论的地裂缝成因机制研究. 震灾防御技术, **7** (1): 46—53.
- 王兰民, 石玉成, 刘旭等, 2003. 黄土动力学. 北京: 地震出版社.
- 王卫华, 李夕兵, 2005. 离散单元及其在岩土工程中的应用综述. 土工程技术, **19** (4): 177—181.
- 王泳嘉, 邢纪波著, 1991. 离散单元及其在岩土力学中的应用. 沈阳: 东北工业出版社.

- 王亚强, 王兰民等, 2004. GIS 支持下的黄土高原地震滑坡区划研究. 地理科学, **24** (2): 170—176.
- 周先齐, 徐卫亚等, 2008. 离散单元法在岩质边坡稳定性分析中的应用. 长江科学院院报, **25** (5): 107—109.
- 中华人民共和国国家标准, 2002. 建筑边坡工程技术规范 (GB 50330-2002). 北京: 中华人民共和国建设部.
- 中华人民共和国国家标准, 2006. 工程场地地震安全性评价 (GB 17741-2005). 北京: 中国标准出版社.
- 中华人民共和国地质矿产行业标准, 2006. 滑坡防治工程设计与施工技术规范 (DZ/T0219-2006). 北京: 中国标准出版社.

Application of Numerical Simulation in the Landslide Hazard Assessment of Seismic Micro-zonation

Zeng Jinyan^{1,2)}, Chen Wen³⁾, Hu Guirang^{1,2)} and Zhuang Mingfang^{1,2)}

1) Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030002, China

2) Continental Rift Valley Dynamics State Observatory of Taiyuan, Taiyuan 030021, China

3) Meichen Building Seismic Engineering Co., Ltd. of Beijing, Beijing 100027, China

Abstract In seismic safety evaluation seismic landslide assessment is commonly conducted by qualitative analysis, especially in the seismic micro-zonation work, so quantitative evaluation result of the scope of such hazard is not given. In the paper, taking Lvliang new town as the case study, we selected profiles with typical features through analyzing the geological conditions of the study area. Potential stability of landslides is calculated by the discrete element method, with seismic force, cohesion, friction angle as factors, getting the sliding sphere of influence of the possible instability of the landslides. Considering the potential landslides with the same structural features having the same instability, we inferred the influence scope of the entire study area by analogy the profile characteristics and structural characteristics of the known landslides and the potential landslides. The results provide basis for the planning and sitting of Lvliang new town, and also provide a reference method for quantitatively evaluating the seismic landslide geological hazard in similar projects.

Key words: Seismic micro-zonation; Landslide; Quantitative evaluation; Analogy method