

聂忠权, 范文, 陈党民, 等. 黄土崩塌体的地震稳定性评价——以陕西咸阳为例[J]. 灾害学, 2014, 29(4): 93–97.
[Nie Zhongquan, Fan Wen, Chen Dangmin, et al. Seismic stability evaluation of Xianyang City collapse in Shaanxi province [J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(4): 93–97.]

黄土崩塌体的地震稳定性评价

——以陕西咸阳为例*

聂忠权^{1,2}, 范文¹, 陈党民³, 刘玉洁²

(1. 长安大学 地质工程与测绘工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 四川交通职业技术学院,
四川 成都 611130; 3. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068)

摘 要: 由于黄土节理密集、裂隙发育, 地震在黄土分布区往往诱发大量大规模的崩滑灾害。为了查明咸阳市崩塌体的地震稳定性, 采用现场调查和统计分析方法, 查明了咸阳市崩塌地质灾害受构造和地震作用控制, 主要发育在黄土陡崖地带, 呈带状分布于渭河二级阶地后缘与三级阶地前缘交接处, 具有在特定区域范围内群发的空间分布特征; 而且, 多集中发生于每年的7–9月份, 还具有雨季周期性突发的时间分布特征; 经力学分析和“块体平衡理论”计算得知, 在50年超越概率2%的情况下, 咸阳市区的崩塌体容易发生失稳破坏。

关键词: 地震地质灾害; 崩塌; 地震; 稳定性评价; 块体平衡理论; 黄土; 陕西省咸阳市

中图分类号: P642.22; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2014)04–0093–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2014.04.018

1920年12月16日, 宁夏海源地震触发了面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 多达657处的崩塌滑坡^[1]。据初步统计, 2008年汶川8.0级强震触发了15 000多处崩塌等地质灾害^[2]。由于黄土节理密集、裂隙发育, 在沟壑、山地和丘陵等地形起伏大的黄土地区, 地震崩塌的危害往往比震害还要大, 除了直接摧毁村庄场镇、学校和厂矿, 造成人员伤亡以外, 还常常会堵塞公路导致救援困难, 引发堰塞湖溃决洪水, 地震导致的坡体松散开裂, 更会在震后多年间给震区遗留下数不清的泥石流、滑坡、崩塌等地地质灾害隐患。

对地震崩塌的研究, 目前已从统计分析转向运用数字化技术计算预测研究的初步阶段。

理论分析工作是计算预测研究必不可少的基础, 对地震崩塌滑坡的统计分析研究, 国外的学者起步较早, Prestininzi、Papadopoulos 和 Keefer 等学者分别对上世纪意大利、希腊和美国的有记载的地震进行统计的分析, 给出了地震崩塌滑坡与地震烈度、震中距之间的关系以及崩塌滑坡面积与地震震级、发震断裂的关系^[3–6]。此后, 我国的学者, 也对国内地震震级、烈度及其他地震参数与地震崩塌滑坡的分布等等, 做了大量的研究工作。近年来, 黄润秋、殷跃平、苏凤环等学者对

汶川地震诱发崩滑进行了统计分析, 研究了发震断裂、岩性等对崩滑体的控制作用^[7–9]。

由于地震崩塌的影响因素复杂, 作为统计分析工作的深入和延续, 计算预测逐渐点明了理论分析工作的重点和方向。Mark 等^[10]利用 GIS 数据库中的1 500个滑坡研究了浅层滑坡频度与地形的关系; 陈晓利等^[11]选取了地震烈度、地层岩性等8个因子作为1976年龙陵地震诱发滑坡的影响因子, 利用CF方法, 研究了滑坡对这些因子的敏感性。向灵芝等利用GIS技术对地震地质灾害的分布与地层岩性、距断裂距离、坡度、高程等因素的关系进行统计分析, 并结合崩滑的确定性系数方法(CF), 对诸影响因子进行敏感性分析, 确定了该区域内各因子最利于地震崩塌与滑坡发育的数值区间^[12]。

地震在黄土分布区往往诱发大量大规模的崩滑灾害, 但在黄土地区地震崩塌体稳定性的相关研究却很少。尤其在陕西省咸阳市, 以往没有开展崩塌体的地震稳定性评价。为此, 本文在查明咸阳市崩塌体的分布规律基础上, 采用“块体平衡理论”, 对不同地震力作用下的崩塌体进行稳定性评价, 为咸阳市的抗震设防工作提供理论基础。

* 收稿日期: 2014–03–18 修回日期: 2014–07–03

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972181); 国家自然科学基金项目(41302251); 陕西省自然科学基金项目(2013JQ5005); 长安大学中央高校基金项目(2013G3262011); 陕西省咸阳市防震减灾“十一五”重点项目之一“咸阳市地震小区划项目”

作者简介: 聂忠权(1970–), 男, 辽宁铁岭人, 博士研究生, 副教授, 研究方向为地质工程. E-mail: nzq7016@163.com

表 1 咸阳市主要崩塌体基本特征统计表

编号	名称	位置	地貌	宽/m	高/m	规模	类型
B01	马泉村崩塌	马泉镇西马泉村北, 供水站后	三级阶地	72.5	13.1	小型	黄土崩塌
B02	赵家村崩塌	赵家村内, 南临珠泉路	三级阶地	30	9	小型	黄土崩塌
B03	查田村崩塌	查田村村北	三级阶地	49.9	10.5	小型	黄土崩塌
B04	红旗砖厂崩塌	魏家泉村红旗砖厂北侧	三级阶地	123.8	15.5	小型	黄土崩塌
B05	永安堡村崩塌	永安堡村半坡	三级阶地	35	11.1	小型	黄土崩塌
B06	石斗村五组崩塌	石斗村五组	三级阶地	31.3	7.3	小型	黄土崩塌
B07	石斗村三组崩塌	石斗村三组	三级阶地	22.1	11.2	小型	黄土崩塌
B08	苏家堡二组崩塌	苏家堡二组	三级阶地	44.6	7.7	小型	黄土崩塌
B09	苏家堡一组崩塌	苏家堡一组一居民的后院中	三级阶地	31.5	12.2	小型	黄土崩塌
B10	肖家堡一组崩塌	肖家堡一组	三级阶地	44.8	6.7	小型	黄土崩塌
B11	吴家堡崩塌	吴家堡居民区内	二级阶地	22	3	小型	黄土崩塌
B12	龚西 3530 塬边崩塌	3530 厂附近塬边	二级阶地	25	8	小型	黄土崩塌
B13	龚东村崩塌	龚东村一居民家后院	一、三级阶地	84.6	21.2	小型	黄土崩塌
B14	龚东村崩塌 II	龚东村村北塬边	一、三级阶地	51	17.1	小型	黄土崩塌
B15	龚西村七组崩塌	龚西村七组	一、二级阶地	100.8	11.1	小型	黄土崩塌

表 1, 具体位置见图 1。

1 崩塌灾害的时空分布规律

陕西省咸阳市地处渭河断陷带内^[13], 广泛分布第四系黄土, 属抗震设防烈度 VIII 度区。由于咸阳地区的新构造运动处于抬升状态, 塬体抬升, 沟谷深切, 产生了临沟谷而悬空的黄土陡崖, 崩塌体沿陡崖线性带状分布。

经现场调查和统计分析, 渭河二、三级阶地相对高差 20 ~ 30 m, 黄土陡坎、陡崖较多见, 坡度 80 ~ 90°, 主要出露第四系的黄土, 力学性质薄弱, 节理发育, 疏松多孔, 具有强烈的湿陷性, 降水时易发生崩塌等地质灾害^[14]。

咸阳市黄土崩塌主要发育在黄土陡崖地带, 呈带状分布于渭河二级阶地后缘与三级阶地前缘交接处, 具有在特定区域范围内群发的空间分布特征; 多集中发生于每年的雨季 7 ~ 9 月份, 具有雨季周期性突发的时间分布特征。经野外调查发现 15 处崩塌灾害点, 其分布类型与规模统计见

2 形成条件及影响因素

2.1 形成条件

(1)地形地貌: 崩塌的内因, 咸阳市主要地貌形态为渭河阶地, 一级阶地和二级阶地的高差随着城市发展建设已不明显, 二级阶地、三级阶地间以陡坎相接, 高差 15 ~ 25 m。堆积在陡坡或陡崖上的松散物, 因为有高差, 存在势能转化动能的可能, 在雨水、地震等其他外部因素的作用下, 发生滑动或崩塌。

(2)地层岩性: 咸阳市广泛分布的第四系黄土、黄土状土、粘性土、砂砾石, 尤其是黄土节理发育, 虫孔、孔隙多, 遇水容易发生崩解、湿陷, 是地质灾害形成的物质基础^[15]。调查结果显示, 不同岩性的接触界面如黄土中, 粉土、粉质粘土与古土壤及钙质结核层间是一个力学薄弱面; 往往构成一个天然的软弱构造面, 黄土容易沿薄

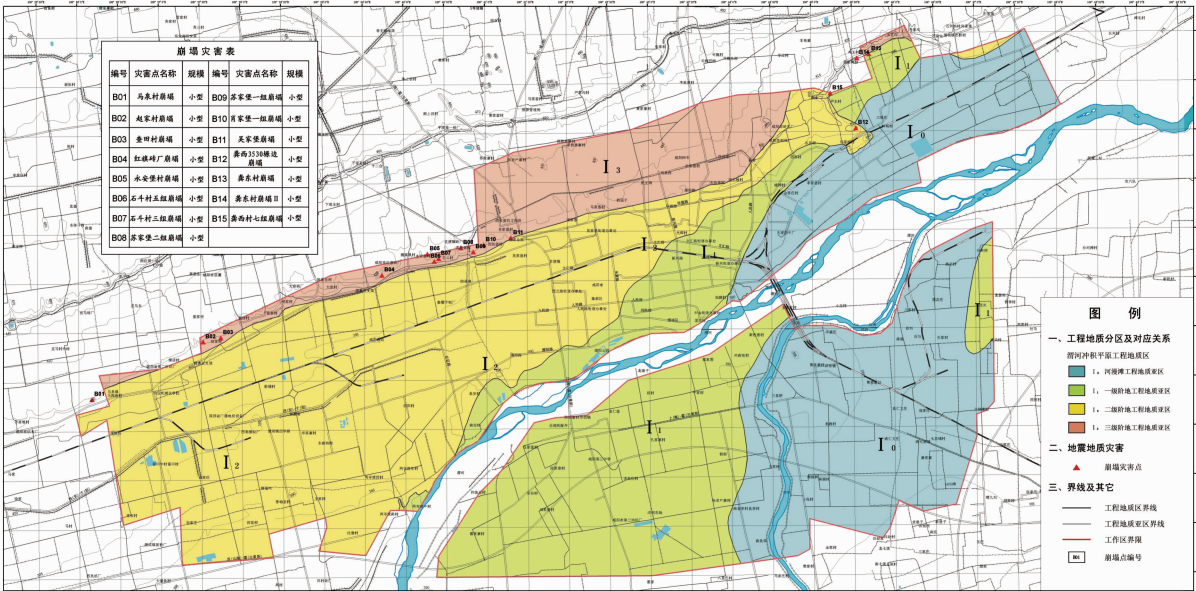


图 1 咸阳市主要崩塌体分布位置图

弱面滑动或失稳, 在降水或地震的诱发下, 崩塌频繁发生。

(3)地质构造: 咸阳市的构造以近东西向渭河断裂为主^[16]。断裂构造控制了本区地质灾害点的分布。例如沿渭河断裂, 地质灾害点呈带状密集发育。由于构造活动强烈, 黄土中节理密集、裂隙发育, 为地质灾害的发育打下了物质基础。新构造运动地壳上升, 河流下切, 导致河谷两侧谷坡陡峻、渭河高阶地及黄土塬边沟壑陡峭, 提供了有利于崩塌形成的地形条件。

2.2 影响因素

(1) 大气降水、地表水、地下水

咸阳市地处渭河南北两岸阶地, 新生代以来堆积较厚松散沉积物, 特别是几十米厚冲积层粗颗粒, 含有丰富的地下水资源。其地下水主要为孔隙水和承压水。地下水可以降低岩土体强度, 当下伏为隔水层时, 上覆岩土层遇水易泥化或软化, 抗剪强度降低。另一方面岩土体含水容重增加, 孔隙水压力增高, 也会导致崩塌等地质灾害的发生。

(2) 地震

据历史记载和现代仪器记录, 关中地区范围内自公元前 2300 年以来发生 4 级以上地震 73 次, 其中 5.0~5.9 级地 43 次, 6.0~6.9 级地震 8 次, 7.0~7.9 级地震 2 次, 8.0~8.9 级地震 1 次, 最大地震为 1556 年 2 月 2 日陕西华县 8 级地震, 震中烈度为 XI 度。地震作用使黄土遭受多重破坏, 地震本身的惯性力, 使黄土体结构破坏, 抗剪强度降低。加之饱和黄土或砂土在地震力作用下发生震动液化而产生超孔隙水压力, 短时间内改变了土的物理性质, 降低了土的力学性能, 导致崩塌。

(3) 人类工程活动

人类工程经济活动主要表现为铁路和公路建设、修建水库、切坡建房等。

①工程施工过程中废石、废渣乱堆乱放, 人为地形成失稳斜坡; ②建设住宅、工程和修建公路均需大量切削斜坡, 使得斜坡有效临空面增大, 本来就陡峭的边坡更加陡峻, 形成人工危险边坡, 又很少进行护坡处理, 产生了地质灾害隐患; ③在修路等人类活动过程中, 爆破手段的使用, 使岩土体结构遭到破坏, 强度降低, 破坏了斜坡稳定性, 为崩塌的产生埋下了隐患。

3 典型的崩塌灾害点分析

(1)赵家村崩塌体南临珠泉路, 地理坐标为 34.3317535°N, 108.6254251°E, 位于渭河二级阶地与三级阶地交界处, 出露第四系晚更新统黄土, 该地区陡崖比较发育, 且垂直节理比较发育。崩塌体下部为几处窑洞, 土体从窑洞上方脱落, 堆积在窑洞前, 另外, 窑洞上缘还发育有纵向裂缝(图 2)。崩塌体高 9 m, 宽 30 m, 走向 151.9°。



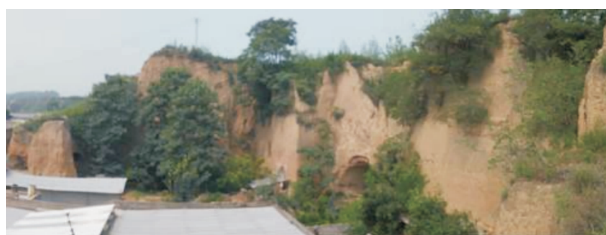
图 2 赵家村崩塌体全貌(镜向 50°)

经野外调查认为引发崩塌的原因主要为降水, 黄土节理比较发育。黄土中孔隙和垂直节理发育, 雨水渗入后, 造成土体湿润、崩解, 结构发生破坏, 从而发生崩塌(图 3)。



(a) 崩塌体前缘脱落堆积土体 (b) 崩塌体前缘垂直节理
(镜向 79.6°) (镜向 79.6°)

图 3 赵家村崩塌体特征



(a) 崩塌西段全景(镜向 184°)



(b) 崩塌东段垂直节理发育 (c) 崩塌后缘长大裂隙
图 4 龚东村崩塌 II 照片

该崩塌体随时可能发生坍塌或土体坠落, 稳定性差, 居住于崩塌体旁边的居民处于危险状态。

(2) 龚东村崩塌Ⅱ位于龚东村塬边(图4), 地理坐标为 34.379 134 5°N, 108.759 383°E。出露地层主要为晚更新世黄土。崩塌体高 17.1 m, 宽 51 m, 走向 257.3°, 表面土体松散, 前缘有较高的临空面, 后缘发育有一条长大裂缝, 距离坡面 2.5 m, 走向 183.9°, 延伸 9 m, 宽 30 cm, 随时有再次发生崩塌的可能。

综合分析认为崩塌体变形与地质构造活动、降水有关。该崩塌体后缘有明显的裂缝发育, 稳定性差, 另外崩塌体下方有村民居住, 如若发生崩塌, 则影响崩塌体下方居民的生命财产安全。

4 崩塌的地震稳定性计算

对于崩塌的地震稳定性评价, 主要依据《工程地质手册》(第四版)中特殊地质条件勘察和评价篇中对崩塌的评价方法—力学分析法^[17]。其稳定性计算用“块体平衡理论”, 同时考虑水和地震力等的作用^[18]。

基本假定: ①整体破坏发生以前, 崩塌体视为一个整体^[19]; ②坍塌体取单位宽度验算, 按平面问题简化计算; ③不考虑块体间的摩擦作用。

咸阳市 15 处崩塌均为倾倒式, 其破坏模式见图 5。A 点为岩土体倾倒时的转折点, 裂隙将不稳定岩土体分割, 验算应考虑各种附加力的最不利组合。Ⅶ度以上烈度区, 要计算水平地震力; 在雨季应考虑静水压力, 因为张开裂隙可能为暴雨充满。崩塌体受力见图 6, 不考虑其他外力时, 抗倾覆稳定性系数 K 计算见式(1)。

$$K = \frac{W \times a}{f \times \frac{h_0}{3} + F \times \frac{h}{2}} = \frac{W \times a}{\frac{\gamma_w h_0^2}{2} \times \frac{h_0}{3} + F \times \frac{h}{2}} = \frac{6aW}{10h_0^3 + 3Fh} \quad (1)$$

(1) 式中: γ 为岩土体的容重 (kN/m³); c 为岩土体的粘
表 2 不同地震力作用下的崩塌体稳定性表

编号	名称	地貌	高 /m	稳定系数 K			
				50 年超越概率 10%		50 年超越概率 2%	
				峰值加速度为 0.235 g 时	峰值加速度为 0.255 g 时	峰值加速度为 0.415 g 时	峰值加速度为 0.450 g 时
B01	马泉村崩塌	三级阶地	13.1	1.645		1.003	
B02	赵家村崩塌	三级阶地	9	1.031		0.656	
B03	查田村崩塌	三级阶地	10.5	1.480		0.908	
B04	红旗砖厂崩塌	三级阶地	15.5	1.646		1.006	
B05	永安堡村崩塌	三级阶地	11.1	1.599		0.978	
B06	石斗村五组崩塌	三级阶地	7.3	1.039		0.661	
B07	石斗村三组崩塌	三级阶地	11.2	1.619		0.992	
B08	苏家堡二组崩塌	三级阶地	7.7	1.245		0.781	
B09	苏家堡一组崩塌	三级阶地	12.2	1.645		1.008	
B10	肖家堡一组崩塌	三级阶地	6.7		1.478		0.912
B11	吴家堡崩塌	二级阶地	3		1.190		0.742
B12	龚西 3530 塬边崩塌	二级阶地	8	1.430		0.892	
B13	龚东村崩塌	一、三级阶地	21.2	1.470		0.916	
B14	龚东村崩塌Ⅱ	一、三级阶地	17.1	1.177		0.748	
B15	龚西村七组崩塌	一、二级阶地	11.1	1.691		1.036	

说明: 稳定系数 $K < 1.000$ 为不稳定; $K \geq 1.000$ 为稳定

式中: f 为静水压力 (kN); h_0 为水位高度, 暴雨时取岩土体的高度 (m); h 为岩土体高 (m); γ_w 为水的重度, 10 kN/m³; W 为崩塌体重力 (kN); F 为水平地震力 (kN); a 为取崩塌体宽的 1/2 (m) A 点至重心的水平距离。

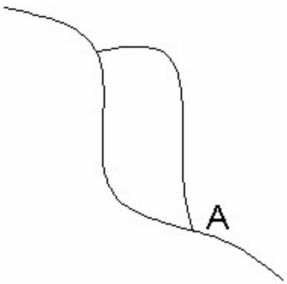


图 5 倾倒式崩塌破坏模式图

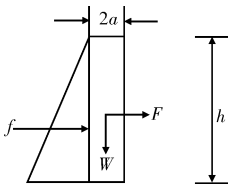


图 6 崩塌体受力分析图

5 计算结果分析

野外调查显示, 坡面至崩塌体后缘裂隙一般相距 2.5 ~ 3 m, 所以常取 $2a$ 为 2.5 m。 h_0 取折中值, 为岩土体的高度的一半。另外, h 常取拉张裂隙的最大值。

土的抗拉强度低, 坡顶拉应力集中, 易出现拉裂缝, 其最大深度为:

$$h = \frac{2c}{\gamma} \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2)$$

式中: γ 为岩土体的容重 (kN/m³); c 为岩土体的粘

聚力(kPa); φ 为岩土体的内摩擦角($^{\circ}$)。

由室内直剪试验,得出土体的粘聚力、容重和內摩擦角,代入式(2),计算最大深度 h 和崩塌块体高度,以及重量 W 。

另外,再结合咸阳市地震小区划峰值加速度区划图及崩塌体地理位置得到每个崩塌体50年超越概率10%与2%下的峰值加速度值。从而可计算出各个崩塌体在50年超越概率10%与2%情况下的水平地震作用力。再将以上计算出的数据代入式(1)中,则可得到个崩塌体在50年超越概率10%与2%下的稳定系数 K 。

按照“块体平衡理论”,同时考虑水和地震力作用,具体计算结果见表2。

表中数据显示,咸阳市崩塌灾害体受地形地貌和地震作用控制明显。

本次研究的15处崩塌灾害体,12处分布于三级阶地前缘陡坡上(B01~B10、B13、B14),3处位于二级阶地前缘陡坡上(B11、B12、B15)。

在50年超越概率10%的情况下均处于稳定状态;而在50年超越概率2%的情况下,有4处基本稳定,其余则会发生失稳破坏。

所以,渭河二级阶地后缘与三级阶地前缘交接处陡坎,在50年超越概率2%的情况下,容易发生失稳破坏,危及坡下住户的生命财产安全,为的主要防治范围。

6 结论

通过野外工程地质调查和勘察,咸阳市区共发现崩塌灾害体15处,呈带状分布于渭河二级阶地后缘与三级阶地前缘交接处,黄土陡崖相对高度一般6~25 m,坡度 85° ~ 90° ,坡形呈台阶状或直线状;多发生于每年的雨季7~9月份,具有区域群发、雨季周期性突发等特征。

经力学分析和“块体平衡理论”计算得知,在Ⅷ度地震烈度、50年超越概率2%的情况下,渭河二级阶地后缘与三级阶地前缘交接处陡坎容易发生失稳破坏,危及坡下住户的生命财产安全,为咸阳市崩塌地质灾害的主要防治范围。

参考文献:

- [1] 辛鸿博,王余庆. 岩土边坡地震崩滑及其初判准则[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 591.
- [2] 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.
- [3] Prestininzi A, Romeo R. Earthquake-induced ground failures in Italy[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 387-397.
- [4] Papadopoulos G A, Plessa A. Magnitude-distance relations for earthquake induced landslide in Greece[J]. Engineering Geology, Special Issue, 2000, 58(3/4): 377-386.
- [5] Keefer D K. Landslides caused by earthquakes[J]. Geological Society of America Bulletin, 1984, 95(4): 406-421.
- [6] Keefer D K. Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution-the 1989 Loma Prieta, California event[J]. Engineering Geology, 2000, 58(3/4): 231-249.
- [7] 黄润秋,李为乐. “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, 2008, 27(12): 2585-2592.
- [8] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报, 2009, 17(1): 29-38.
- [9] 苏凤环,刘洪江,韩用顺. 汶川地震山地灾害遥感快速提取及其分布特点分析[J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 956-963.
- [10] Mark R K, Ellen SD. Statistical and simulation models form apping debris flow hazard[M]//M Carrara A, Guzzetti F. Geographical information system in assessing natural hazard. Amsterdam: Academic Publishers, 1995: 93-106.
- [11] 陈晓利,冉洪流,祁生文. 1976年龙陵地震诱发滑坡的影响因子敏感性分析[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2008, 44(2): 50-55.
- [12] 向灵芝,崔鹏,张建强,等. 汶川地震诱发崩滑灾害影响因素的敏感性分析[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2010, 42(5): 105-106.
- [13] 刘俊峰,罗长胜,刘渭. 陕西咸阳市某厂工程场地地裂缝初步研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(4): 6-7.
- [14] 杨强,秀娟,王爱军,等. 甘肃省灵台县地质灾害特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(4): 45-46.
- [15] 康锦辉. 黄土洞穴物理潜蚀机理试验研究[D]. 西安:长安大学, 2010: 3.
- [16] 苏艳. 关中盆地中部地压型地热流体环境同位素水文地球化学特征研究[D]. 西安:长安大学, 2008: 10-11.
- [17] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[S]. 4版. 北京:中国建筑工业出版社, 2006: 555.
- [18] 许江,李克钢,陈萍,等. 丰都名山崩滑体失稳的离散元模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1819-1822.
- [19] 杨洲. 渭南市地震小区划工程地质分区研究[D]. 西安:长安大学, 2011: 39-41.

Evaluation on Seismic Stability of Loess Landslide Body ——Taking Shaanxi Xianyang as an Example

Nie Zhongquan^{1,2}, Fan Wen¹, Chen Dangmin³ and Liu Yujie²

(1. Geological Engineering and Surveying Engineering College, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Sichuan Traffic Vocational Technical College, Chengdu 611130, China; 3. Earthquake Administration of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China)

Abstract: Due to the concentrated joints and developed fracture of loess, earthquake happened in the loess area often causes large-scale landslides. Field survey and statistical analysis methods are used to find out the seismic stability of the collapse in Xianyang city. It is shown that disasters are controlled by tectonic and seismic effects, mainly developed in loess cliffs zone. It distributed at the trailing edge of Weihe two terraces and three terrace edge junction with the spatial distribution characteristics of group in the specific region. Most of the disasters concentrated occurred in July to September of each year and are of statistical distribution characteristic as periodic burst in rainy season. According to mechanical analysis and calculation by Mass Balance Theory, in the case of 2% probability of exceedance in 50 years, body collapses in Xianyang city are prone to failure.

Key words: earthquake geological disaster; collapse; earthquake; stability evaluation; Mass Balance Theory; loess; Shaanxi Xianyang