

## 岷县漳县 6.6 级地震典型滑坡特征及其诱发机制<sup>①</sup>

徐舜华<sup>1,2,3</sup>, 吴志坚<sup>1,2,3</sup>, 孙军杰<sup>1,2,3</sup>, 严武建<sup>1,2,3</sup>, 苏鹤军<sup>2</sup>, 苏永奇<sup>2</sup>

(1. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**地震和降雨是滑坡产生的两大诱因。一般认为二者的耦合作用概率小,在现实中也较少发现此种实例。岷县漳县 6.6 级地震中黄土地震滑坡广泛发生,本文通过现场调查,在相关降雨量数据、航空影像空间分析的基础上研究了两个地点(永光村滑坡和堡子村滑坡)的典型地震黄土滑坡的空间展布特征和发生、发展过程,分析了诱发机制。结果发现:(1)地震滑坡呈带状分布与地震发震构造走向一致;(2)位于极震区范围的永光村黄土滑坡具有泥流特征,土体含水量可达塑限以上,是由于过量降水和强地震动耦合作用下发生;(3)堡子村黄土地震滑坡则主要为强地震动所诱发,滑距较短,并具滞后发生特性。本结果对未来地震中滑坡的预防与防治具有借鉴意义。

**关键词:**岷县漳县 6.6 级地震;地震滑坡;黄土;降雨;诱发因素

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2013)03-0471-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.03.0471

## Study of the Characteristics and Inducing Mechanism of Typical Earthquake Landslides of the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ Earthquake

XU Shun-hua<sup>1,2,3</sup>, WU Zhi-jian<sup>1,2,3</sup>, SUN Jun-jie<sup>1,2,3</sup>,

YAN Wu-jian<sup>1,2,3</sup>, SU He-jun<sup>2</sup>, SU Yong-qi<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou, Gansu 730000, China;

3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** Earthquakes and rainfall are two main factors to induce landslides. Generally, these two events rarely occur at the same time. However, their coupling occurred in a widespread region during a loess earthquake landslide caused by the Minxian—Zhangxian  $M_s6.6$  earthquake on July 22, 2013, which resulted in significant losses of life and property. The characteristics of development and influencing factors of two typical earthquake landslides including the Yongguang and Puzi landslides are investigated on the basis of site survey, rainfall data, and aerial images. The results indicate that many earthquake landslides are distributed in a band in accordance with the trends of seismo-tectonics. In addition, moisture content was above the plastic limits of loess in the Yongguang landslide, which showed characteristics of mudflow. The reasons for its occurrence differ from previous earthquake landslides and include the coupled effects of excessive rainfall and strong ground motion. Moreover, strong ground motion was also the main factor in the Puzi earthquake landslide, in which the slide distance was very short and continued 40 min following the earthquake. Such investigation results of the two typical loess earthquake landslides

① 收稿日期:2013-08-28;中国地震局兰州地震研究所论著编号:LC2013065

基金项目:中国地震局预测研究所基本科研业务费项目(2013A75-6);冻土工程国家重点实验室开放基金项目(SKLFSE201104);国家自然科学基金项目(40902094)

作者简介:徐舜华(1974-),男,黑龙江拜泉人,博士,副研究员,主要从事岩土地震工程方面的研究。E-mail: xshunh@163.com

are very helpful for the prevention and control of earthquake landslides in the future.

**Key words:** Minxian—Zhangxian  $M_s6.6$  earthquake; earthquake landslide; loess; rainfall; influence factors

## 0 引言

2013 年 7 月 22 日岷县漳县交界发生了  $M_s6.6$  地震,造成 95 人死亡,数十万间房屋倒塌,包括水利、交通、通信和各种生命线工程在内的损失数百亿元。和汶川地震相似<sup>[1-2]</sup>,地震的发生还诱发了许多的次生灾害,其中黄土边坡或者覆盖层的崩塌和滑坡是一种典型的次生灾害。通过现场灾害调查,在Ⅷ级极震区地震滑坡现象比较普遍,造成的人员和财产损失较大。

滑坡的 2 大天然诱发因素:地震和降雨,二者的成因机制完全不同。相对而言,地震通常持时较短,降雨则可能持续很长时间。表面看来,地震和降雨在持时方面的巨大差异使二者之间耦合发生的概率极小,考虑其间的耦合作用似乎没有必要。但是较少的研究表明,地震和降雨耦合作用下对滑坡的诱发是不容忽视的<sup>[3]</sup>。地震滑坡现场调查发现,本次地震中黄土滑坡诱发的原因与以往有所不同<sup>[4-5]</sup>,正是地震和降雨的耦合作用触发了永光村黄土地震滑坡。本文对本次地震中典型滑坡的特征、诱发因素及发生机制进行研究,发现本次地震滑坡与以往地震滑坡的不同点,为地震滑坡的防治提供研究基础。

## 1 地震极震区典型滑坡

### 1.1 地貌及气候

岷县地貌属高原形态,位于西秦岭北支褶皱带。全县山地占 88.8%,南有长江、黄河分水的岷峨山、大拉梁;北有洮河、渭河分水的木寨岭、岭罗山。全境山岭起伏,河流纵横。

主要地貌类型有:

侵蚀切割山区:主要分布在洮河流域及蒲麻河、湫山河、阎井河上游等区,海拔较高,山势陡峻,沟谷深,浅切割,中度侵蚀。相对高差在 400~1 000 m 之间。山坡为沉积、残积及第四纪薄层风积黄土覆盖,水土流失比较严重,山脊岩体裸露,沟地少阶地,气温低,湿润垂直带明显。植被以高山草甸、针、阔叶混交林为主。

高原形态山区:主要分布在班哈山以东至马坞广阔地带及迭藏河上游,海拔 2 800 m 左右,地形起伏较缓,山势低缓浑圆,相对高差 400 m 左右。山间有盆地、滩地、植被完好,以沼泽、草甸沼泽、草甸

草原、山地草甸等为主。气温低而湿润。

河谷川台区:主要分布在洮河、迭藏河流域,地势平坦开阔,阶地Ⅱ~Ⅲ级,中部为川地、坪台。西川、南川、梅川以及东部的狼渡滩、后治滩,均为较大面积的川台区。

岷县地处青藏高原边缘,是甘南高原向黄土高原、陇南山地的过渡地带。境内大部分地方海拔高,受大陆性气团、副热带暖湿气团的交替影响和地形对大气抬升的作用,形成高寒阴湿这一气候特点。降雨量多,气温低,无霜期短,多冰雹等自然灾害。

### 1.2 滑坡特征

地震触发了大量滑坡,滑坡类型各种各样,多以小型黄土崖崩(崩塌、崩落、崩滑)为主,包括深层滑坡、泥流状滑坡等类型较为少见的滑坡。滑坡造成了严重的灾害,包括人员伤亡、电缆、管线、公路与铁路等基础设施损毁,居民点损毁等。造成危害最严重且比较典型滑坡是永光村的一处泥流状滑坡和维新乡堡子村黄土层内滑坡,前者掩埋农居 8 户,造成了 12 人遇难;后者掩埋农居 12 户,造成 2 人死亡。

地震滑坡主要分布在“茶固滩 马家沟 文斗 车路 永光 永兴 拉路”一线,为一个条带状区域,最大宽度约为 8 km,长度约为 30 km(图 1)。这一区域内的滑坡特点为:(1)滑坡密集发育,常常连片堵塞公路;(2)最大规模为中型滑坡,永光村灾难性滑坡就在这一条带内;(3)条带长轴走向与地震发震构造走向一致。

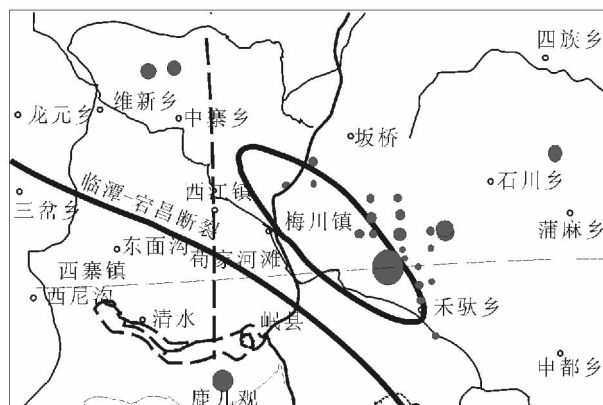


图 1 岷县漳县地震滑坡密集区范围  
(据郑文峻等)

Fig. 1 Distribution region of earthquake landslides in Minxian—Zhangxian county  $M_s6.6$  earthquake  
(from Zhen Wenjun, et al.)

## 1.2 典型滑坡特征

### 1.3.1 永光村滑坡

永光村滑坡分为东西两处(图 2,3),发育于同一坡体之上,物源基本一致。东侧滑坡掩埋 6 户人家,无人员伤亡;西侧泥流状滑坡掩埋 8 户人家,造成 12 人被埋死亡。两处滑坡皆为土层内部滑移,土类为粘土和黄土,粉质含量不均,表层覆盖层较厚。相较东侧滑坡,西侧滑移因土体含水量更高,结合滑移展布形态,可定性为泥流状滑坡。永光村东西两侧坡体滑移相夹的坡体部位未失稳(图 2、图 4)。图 5 是西侧泥流状滑坡前端冲沟两侧崖壁破坏及滑移终止位置的实际情况。



图 2 永光村东侧滑坡  
Fig. 2 The east earthquake landslide near Yongguang village



图 3 永光村西侧泥流状滑坡  
Fig. 3 The west earthquake landslide like mudflow near Yongguang village

#### (1) 永光村西侧泥流状滑坡

西侧泥流状滑坡在平面上近似呈现 L 型,大致 NS 走向。该泥流状滑坡体在滑坡后缘滑移起始位置至前缘终止部位的范围内,呈现连续分布,由土体形态上能够看出该滑坡在滑移时具有相当的流动特性。滑坡后缘宽约 100 m,高度 30 m 左右;滑坡体前缘在冲沟出口位置的宽度约为 13 m,最大滑移距

离约为 1 km。终端止于冲沟出口的桥梁位置,距离桥基约 0.5 m。滑坡整体落差约为 253 m,平均坡度 18°,土方量约为 40 万立方米。



图 4 永光村滑坡主体(左侧为泥流状滑坡,右侧为滑坡,中间部位未失稳)

Fig. 4 Main section of Yongguang earthquake landslide (the left is mudflow, the right is landslide and the middle is stable section)



图 5 永光村滑坡(泥流)临近末端冲沟的滑塌(含水量较高)

Fig. 5 The section of mudflow near the end of Yongguang earthquake landslide in ditch (with higher moisture content)

#### (2) 永光村东侧滑坡

由滑坡体后缘形态对比可知,永光村东侧滑坡与西侧泥流滑坡规模基本相当,滑体在平面上呈面状展布,其主轴大致 NS 走向。滑坡体后缘残留土体高耸,后缘宽度约 100 m,高约 30 m;滑坡体最前缘滑移距离约为 200 m,土方量约 33 万立方米。

### 1.3.2 维新乡堡子村滑坡

堡子村滑坡位于岷县维新乡,距离乡政府所在地东面约 2 km。据村民介绍,该滑坡触发于岷县 6.6 级地震之后约 40 分钟(考虑危难状态下人对时间估计的不可靠性,该延后时间可能较短,可能在 30 分钟之内)。

滑坡体展布形态:堡子村滑坡距洮河约 1 km,属于黄土层内滑坡。该滑坡后缘近乎直立,倾角约  $70^\circ$ ,最高点至坡脚高差约 200 m,滑移距离不足 100 m。滑坡后缘能够明显观察到的滑移后壁面长约 150m,高约 80m,滑坡体土层厚度近 30m,初步估算滑坡体总土方量约 70~100 万立方米(图 6、7)。



图 6 维新乡堡子村黄土地震滑坡

Fig. 6 Loess earthquake landslides near Puzi village in Weixin town slip



图 7 堡子村滑坡滑移面的后缘

Fig. 7 The back of slide face of Puzi landslide

## 2 过程分析及诱发因素

### 2.1 永光村滑坡

#### (1) 永光村西侧泥流状滑坡

依据其分布特征,西侧滑坡体失稳之后冲破原有前端凹形地势,滑移进入与之交角约  $30^\circ$  的大型冲沟(在永光村和永星村范围内其长度与宽度最大),顺沟向下游滑冲,止于永光村和永星村分叉路口北侧的拱桥前。该泥流状滑坡在进入冲沟的位置可明显看到滑体受阻形成的土堆,并且有部分泥流回溯入该冲沟上游,最大距离约为 20 m。泥流回溯与泥流及冲沟上游底部的落差有关,回溯泥流规模不大,表明泥流运移速度较快,这与现场考察过程中由当地居民处了解的情况相一致。

根据本次现场考察结果,可以认定永光村西侧

泥流状滑坡是降雨与地震耦合作用下的产物。由该滑坡展布形态容易推测滑坡体内部含水量较高。这一点在现场考察过程中进行的初步含水量测试及该区降雨量数据(表 1)得以证实。测试结果表明,滑坡土体含水量高于塑限,低于液限(图 8)。同时,在滑坡后缘遗留土体中局部土体表面能够观察到明显水渍;某些车辆碾压痕迹中明显观察到土体软化现象,其内部可能出现似液化行为。据当地村民介绍,岷县 6.6 级地震前夕当地连续几天遭受中雨,并在地震前一天晚上遭遇暴雨。与前 2~3 年相比,今年的雨量相对较少,村民本以为不会有什么问题,但没料想地震的发生。需要注意的是,该滑坡后缘原址有山泉出露,山泉的发育可能是诱发该侧滑移的不



图 8 永光村西侧滑坡(泥流)土体含水量现场测验(高于塑限,低于液限)

Fig. 8 Moisture content testing for the west landslide (mudflow) of Yongguang village (higher than plastic limit and lower than liquid limit)

可忽视的因素。

表 1 梅川镇地震前一天降雨量记录及平均降雨量比较  
(据定西市气象局)

Table 1 Rainfall the day before earthquake and mean data (from Dingxi weather bureau)

时间	降雨量 /mm	年平均降 雨量/mm	雨季平均降 雨量/mm
21 日 13—14 时	0.2	596.5	
21 日 14—15 时	1.0		
21 日 15—16 时	0.0		
21 日 16—17 时	1.0		
21 日 17—18 时	0.6		
21 日 18—19 时	0.5		
21 日 19—20 时	0.4		
21 日 20—21 时	0.7		
21 日 21—22 时	0.7		
21 日 22—23 时	0.4		
21 日 23—0 时	0.5		
22 日 0—1 时	0.6		
日降雨量	6.6	1.63	2.48

## (2) 永光村东侧滑坡

由于震前连绵大雨,地震发生当天村民较平时起床较晚,且多在家中休息。东西两侧滑坡规模相当,但人员伤亡差异显著,可以初步推测东侧滑坡触发时间较西侧稍晚,但时间间隔不会太长。可能是这一时间差使东侧滑坡周边居民幸免于难。对比而言,东侧滑坡体滑移特征与西侧滑坡体差异显著,主要体现在滑坡体滑移距离、土体展布方式、滑坡体物性参数及滑移速度等方面。在相同高程的位置上,西侧滑坡后缘可见,但东侧滑坡残留土体高耸且土质极为松散,不见后缘坡壁。现场考察可见东侧滑坡体在脱离原有位置后沿直线滑移了一段距离,其最前端止于一小型冲沟。

东侧滑坡的主导诱因与西侧滑坡相同,也是降雨与地震耦合作用下的结果。不同的是,东侧滑坡后缘并无山泉出露,土层内部水体渗透性可能较西部差,所以在相同降雨条件下,属于同一坡体不同部位的土体失稳在滑移特征上具有显著差异。现场考察结果也显示东侧滑坡内部土体的含水量较西侧泥流状滑坡低。

## 2.2 维新乡堡子村滑坡

相较永光村滑坡,堡子村滑坡的滑移面倾角更高,滑移距离更短。同时,堡子村滑坡体内部含水量很低,与永光村滑坡体含水量高于塑限接近液限不同,低于塑限。值得关注的一点是,从目前坡体形态来看,该滑坡很可能尚未达到可靠的平衡态,该滑坡滑移面上的出现横向裂缝(图9),为上覆土体滑移拉裂所致,滑移趋向使之向右侧立壁偏转,说明滑坡有进一步发展的可能。若考虑接下来灾区的降雨或



图9 堡子村滑坡滑移面上的横向裂缝

Fig. 9 Cross crack on the back of slide face of Puji landslide

者再次强余震地震发生的可能,应对该滑坡周边及下部的居住点安全给予充分重视。尽快针对滑坡体

进行有效切削或者加固措施,以降低再次滑移的风险。

堡子村滑坡与永光村滑坡基本特征差异显著,一是土类不同,二是含水量差别很大,这两点导致堡子村滑坡虽然也由地震诱发,但其极具个体特色。根据此次初步考察,可得如下结论:此次滑坡为主震导致坡体失稳,后余震诱发滑动发生;此滑坡为黄土层内滑坡;此次滑坡体的滑移动能很可能还未完全释放。

## 3 结论

(1) 本次地震滑坡前过量的降雨及黄土覆盖层中山泉出露是永光村黄土滑坡发生的重要因素。东西两侧滑坡滑动距离的不同体现了土体含水量的差别。

(2) 地震及其地震动放大效应是本次地震滑坡主要诱发因素。

(3) 黄土边坡效应是地震滑坡的潜在不稳定因素。永光村和堡子村黄土地震滑坡位置均处于较厚黄土覆盖层边缘部位,在强地震作用下其不稳定的风险得到了加强。

(4) 以往的一些研究表明,伴随地震发生的滑坡产生的主要和直接原因是强地震动作用,较少发现水在发生中起的作用。而本次地震滑坡有所不同,永光村地震滑坡是地震动与降水共同作用的结果,这为以后地震滑坡的预防和防治有借鉴意义。

致谢:感谢7.22岷县6.6级地震科学考察队在现场的辛苦工作,感谢郑文峻和其调查小组提供的区域地震滑坡工作成果,刘琨提供的岷县气象资料。

## 参考文献(References)

- [1] 刘新荣,胡元鑫,葛华,等. “5·12汶川地震”映秀极震区地震滑坡编目分析[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2011,34(10): 86-96.  
LIU Xin-rong, HU Yuan-xin, GE Hua, et al. Analyses of Earthquake-induced Landslide Inventory in Yingxiu Meizoseismal Area of 5·12 Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2011, 34(10): 86-96. (in Chinese)
- [2] 郭小花,李小林,赵振,等. 青海4·14玉树地震地质作用对地质环境影响分析[J]. 工程地质学报,2011,19(5):685-696.  
GUO Xiao-hua, LI Xiao-lin, ZHAO Zhen, et al. Effects of 4·14 Yushu Earthquake in Qinghai on Geological Environment [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(5): 685-696. (in Chinese)
- [3] 孙军杰,王兰民,龙鹏伟,等. 地震与降雨耦合作用下区域滑坡灾害评价方法[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(4):1-9.

- SUN Jun-jie, WANG Lan-min, LONG Peng-wei, et al. An Assessment Method for Regional Susceptibility of Landslides under Coupling Condition of Earthquake and Rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4):1-9. (in Chinese)
- [4] 侯景瑞,袁中夏. 汶川地震滑坡与影响因素[J]. 西北地震学报, 2011, 33(21):398-402.
- HOU Jing-rui, YUAN Zhong-xia. Influence Factors of the Landslides Caused by Wenchuan Earthquake[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(21):398-402. (in Chinese)
- [5] 袁进科,黄润秋,裴向军,等. 汶川地震触发平溪村滑坡特征及成因分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3):110-119.
- YUAN Jin-ke, HUANG Run-qiu, PEI Xiang-jun, et al. Characteristics and Cause Analysis of the Pingxi Landslide Triggered by the Wenchuan Earthquake[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(3):110-119. (in Chinese)