

河谷地区黄土地震滑坡特征与影响因素分析

王 震^{1, 2}, 王兰民^{1, 2, 3}

(1. 甘肃省地震局(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: 河谷地区历年来地震滑坡灾害严重。通过分析典型河谷城市 100 余个黄土滑坡影响因素的数据, 结合前人工作, 对滑坡进行了针对性的分类, 将河谷城市黄土地震滑坡分为黄土内滑坡、黄土—基岩接触面滑坡以及黄土—基岩滑坡。通过研究针对危险边滑坡防治给出建议, 在河谷地区地震黄土斜坡稳定性分析和灾害预测中需要考虑多项影响因素。

关键词: 河谷地区; 黄土; 地震滑坡; 影响因素

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S1-0434-05

作者简介: 王 震(1988-), 男, 河北石家庄人, 中国地震局兰州地震研究所研究生, 岩土地震工程专业。E-mail: piaomiaolf2007@163.com。

Characteristics and influencing factors of seismic loess slopes in valley areas

WANG Nai^{1, 2}, WANG Lan-min^{1, 2, 3}

(1. Earthquake Administration of Gansu Province (Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, CEA), Lanzhou 730000, China; 2.

Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China; 3. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research

Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: There are seriously seismic landslide disasters in the valley areas over the years. The influencing factors of more than 100 typical loess landslides are analyzed. By combining the previous work, the landslides in valley cities of loess areas are divided into three types: homogeneous loess landslide, loess-bed rock interface landslide and loess-bed rock landslide. Through the investigation and analysis of earthquake risk, some suggestions are given. Many factors should be considered in the stability and hazard prediction of seismic loess slopes.

Key words: valley area; loess; seismic landslide; influencing factor

0 引言

我国西部许多地区为高原、山地、丘陵地形, 是很多河流的发源地和流经区域。河谷地区通常具有新构造运动强烈、黄土广布、气候干燥、降水集中的特点^[3]。

研究表明, 河谷地区的黄土是低含水率、低密度、大孔隙、黏粒含量低、结构疏松、节理发育, 具有粒状架空空隙结构的自重湿陷性黄土和强烈湿陷性黄土, 在动荷载的作用下具有明显的震陷性, 是地震易损性很高的土体。由于地震作用, 加剧了土的结构的破坏, 因此河谷地区极易发生滑坡、液化等灾害^[12]。针对河谷地区黄土地震滑坡的研究, 孙崇绍、张振中、王兰民、石玉成、吴玮江、王念秦、陈永明、王峻等均作了大量工作。在河谷地区的研究中, 前人的工作重点主要放在了区划和环境地质评价上, 而地震引发的河谷地区黄土地震滑坡的研究较少。

通过对河谷地区包括 1654 年天水南 8.0 级、1718 年甘肃通渭 7.5 级和 1920 年海原 8.5 级地震诱发的 104 个地震滑坡进行研究, 分析了黄土地震滑坡的基本特征与滑坡滑距影响因素, 以期为黄土地震灾害区划和防震减灾工作提供服务。

1 黄土地震滑坡的分类简介

由于地质环境差异巨大, 导致我国滑坡类型繁多, 性质各异。对于滑坡的分类始终未有统一的标准。虽然各行各业在相关规范与标准中均将黄土地震滑坡单独列出作为滑坡的一种类型, 然而在对黄土高原中河谷地区地震滑坡研究中, 需要更加细化, 利于反映出河谷地区黄土地震滑坡的实际特征与影响因素。针对黄土

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978239); 公益性行业科研专项项目(201008006-4)

收稿日期: 2013-02-28

滑坡的细化分类有许多, 如表 1 所示。

表 1 黄土滑坡的分类^[9]

Table 1 Classification of seismic loess slopes^[9]

滑坡分类		具体分类	
地层岩性	黄土层内滑坡	黄土—基岩接触面滑坡	黄土—基岩滑坡
滑体厚度	浅层滑坡	中层滑坡	深层滑坡
形成原因	自然滑坡	工程滑坡	
滑坡规模	小型滑坡	中型滑坡	大型滑坡
滑动速度	蠕动滑坡	慢速滑坡	中速滑坡
形成年代	古滑坡	老滑坡	新滑坡
力学性质	牵引式滑坡	推动式滑坡	
滑坡后活动性	活滑坡	死滑坡	

由于已知的滑坡分类众多, 则需要通过对影响滑坡的众多因素进行分析和对比, 来确定一种分类方法, 利于对河谷地区黄土地震滑坡的特征及稳定性的工作。

2 地震滑坡及其影响因素关系研究

地震滑坡的发生与形成以及滑距受到多种影响因素的控制。这些因素包括: 烈度、地形、坡度、比高、坡角、土层岩性等。这些因素是滑坡发生以及规模的充分条件。只有处于一定条件下, 在地震发生时才有可能失稳产生滑坡。分析不同因素对于滑坡的影响规律, 对河谷地区黄土地震滑坡的特征类型研究、数值模型建立、稳定性分析有着重要的意义。

2.1 研究区内地震滑坡空间分布

1654 年天水南 8.0 级、1718 年通渭 7.5 级、1920 年海原 8.5 级等 3 次地震诱发黄土滑坡分布及发育特征如图 1~3。由图 2 可知, 3 次地震诱发黄土滑坡分布范围、滑坡密集区面积、展布形态均有较大差别。

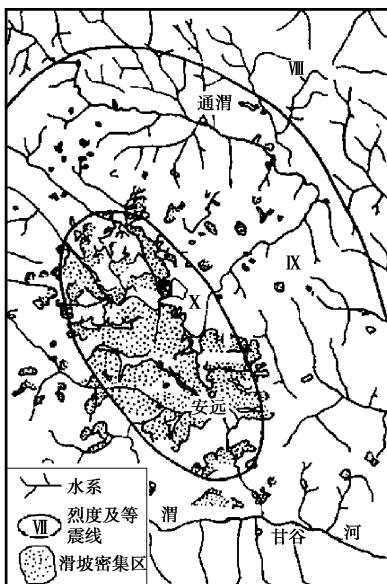


图 1 1718 年通渭地震滑坡分布图

Fig. 1 Distribution of landslides caused by Tongwei earthquake in

1718

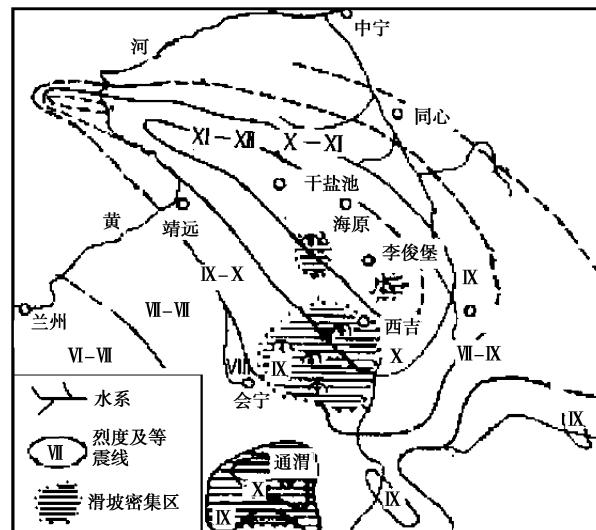


图 2 1920 年海原地震滑坡分布图^[1]

Fig. 2 Distribution of landslides caused by Haiyuan earthquake in 1920^[1]

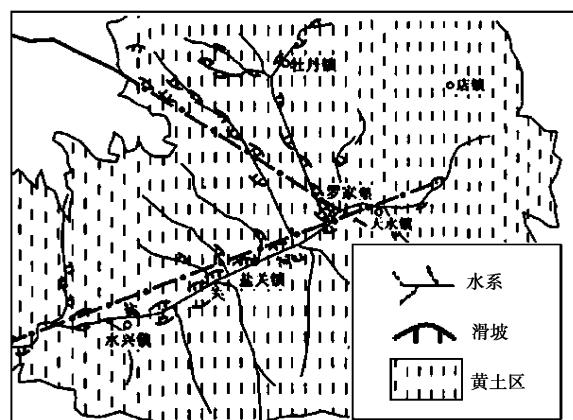


图 3 1654 年天水南地震滑坡分布图^[2]

Fig. 3 Distribution of landslides caused by South of Tianshui earthquake in 1654^[2]

如图 3 所示, 受大地构造、地形地貌条件、地震烈度、土层特性等因素的影响, 地震滑坡在一些地方密集分布, 表现为线性分布或者区域分布, 多分布于活动构造带上。体现了地震滑坡独有的成群性与规模性。

2.2 地震滑坡受烈度影响规律

烈度作为衡量一个地方受地震破坏程度的量。当地震发生时, 不同烈度区内地震滑坡规模不同, 不同烈度区内地震滑坡单位面积产生数目不同。在黄土地区, 诱发滑坡的震级与烈度一般较低, 如 1962 年 12 月 11 日甘谷 5.0 级地震和 1970 年 12 月 4 日西吉 5.4 级地震均引起了突出的黄土地震滑坡^[10]。而地震震级大于 7 级时地震影响的高烈度区内则会出现成规模的滑坡和滑坡密集区。如图所示, 在烈度达到 VI 度时出现黄土滑坡, 当烈度大于 IX 度时则出现大规模滑

坡和滑坡密集区。通过天水市 22 个斜坡观测点, 可以通过数值模拟计算得出滑坡与烈度的规律, 如图 4 所示。

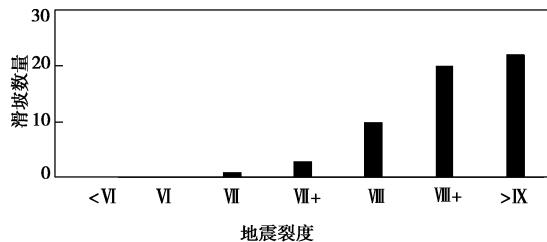


图 4 不同地震烈度下滑坡产生数量分布

Fig. 4 Distribution of landslides under different seismic intensities

2.3 地震滑坡受比高影响规律

滑坡的比高体现了地表的起伏变化, 反应了岩土的势能差。其对于滑坡的产生频率有影响。对于地震滑坡而言, 地震滑坡是在内外因素共同作用下产生的, 其有一个强烈的地震能量触发条件, 一般为大量滑坡同时或短时间内发生, 具有成群性^[11]。理论上就讲比高越大滑坡越容易发生, 但在统计中发现, 存在一个地震滑坡发生频率最高的范围区间。比高主要分布于 30~40 m。当比高在 50~250 m 时是滑坡易发区域, 如图 5 所示。

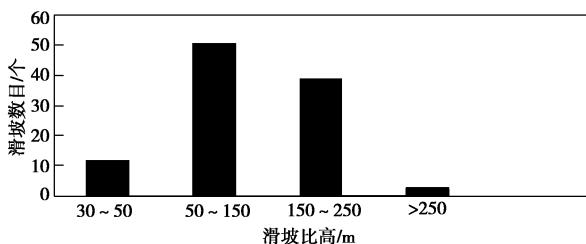


图 5 不同比高下滑坡产生数量分布

Fig. 5 Distribution of landslides under different relative altitudes

2.4 地震滑坡受坡角影响规律

坡角是控制滑坡发生的一个主要内在因素, 是岩土稳定性的一个衡量指标, 其大小反映了土体产生滑动的可能性大小。坡角决定了斜坡的形态。虽然理论上认为坡角越陡, 则越容易发生滑坡。然而, 由于其他因素制衡, 如图 6 所示, 地震滑坡坡角主要分布于 10°~25°。

2.5 地震滑坡受土层岩性影响规律

对斜坡稳定性产生影响的黄土物理力学特性参数主要包括内黏聚力、内摩擦角与重度。通过数值模型, 在确定两个变量的同时对第三个变量进行规律性分析, 可以从图 7~9 看出, 斜坡安全系数在黄土内黏聚力与内摩擦角变化范围内呈线性上升趋势, 而会随着

黄土重度的增加而降低。

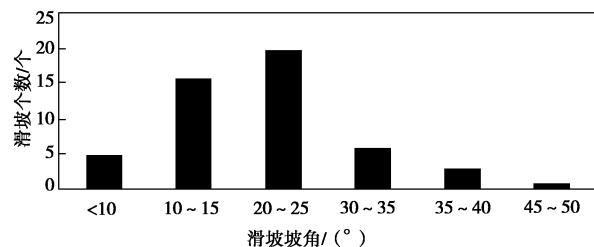


图 6 不同坡角下滑坡产生数量分布

Fig. 6 Distribution of landslides under different slope angles

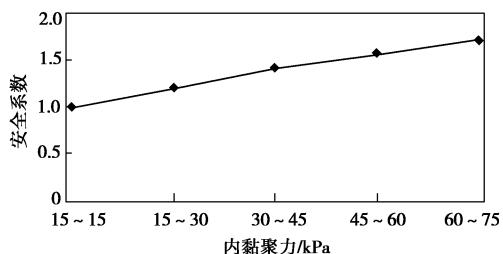


图 7 不同内黏聚力下斜坡安全系数分布

Fig. 7 Distribution of slope safe factor under different internal cohesions

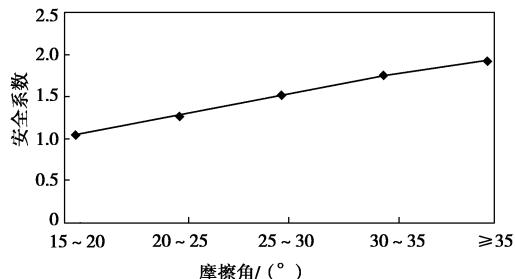


图 8 不同内摩擦角下斜坡安全系数分布

Fig. 8 Distribution of slope safe factor under different internal friction angles

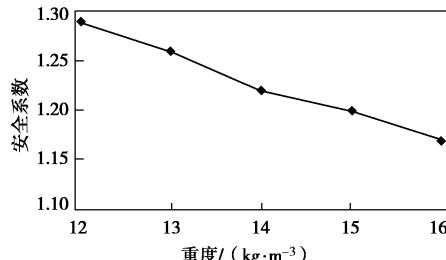


图 9 不同重度下斜坡安全系数分布

Fig. 9 Distribution of slope safe factor under different unit weights

根据上图曲线呈现的趋势, 可以看出随着内摩擦角的增加, 斜坡安全系数的上升趋势比随着内黏聚力的增加斜坡安全系数的上升趋势略微明显, 从单一因素角度分析, 则内摩擦角对安全系数的影响较内黏聚力影响更大。而土的重度的上升导致了安全系数的下

表 2 黄土地区地震滑坡分类^[7]Table 2 Classification of seismic landslides n loess areas^[7]

土层分布	滑坡类型	滑面分布	特征
黄土层	纯黄土层内产生的滑坡	主滑面分布于相对均匀的黄土层内	滑坡土体主要由不同时代的黄土及黄土状土组成, 滑面光滑, 坡度较陡, 大部分属于高速滑坡 ^[8]
黄土层/基岩	黄土层与基岩接触面结构遭到破坏产生的滑坡	主滑面分布在黄土层与基岩接触面位置	由于黄土层与基岩接触面受到地震结构遭到破坏, 产生滑坡, 滑体主要由黄土组成, 含有少量基岩, 倾角较为平缓
黄土层/基岩	沿土层软弱层或土层节理或裂隙带结构面产生滑坡	主滑面发育于黄土层与基岩中	滑坡土体由黄土以及基岩组成, 坡角较缓

降。分析单一土的物性参数并不能充分研究其对斜坡安全系数的影响。对多因素进行拟合, 将多个物性参数纳入计算范围才能更加准确的计算和分析河谷地区地震作用下黄土斜坡的安全系数。

3 河谷地区黄土地震滑坡特征分析与分类

由于影响河谷地区黄土地震滑坡因素众多, 在经过对各个因素进行分析后, 通过对参考各因素对滑坡影响的程度, 结合前人的研究, 本文以地层岩性作为分类条件对河谷地区黄土地震滑坡进行研究。通过对众多河谷城市 104 个地震滑坡进行分析统计, 将河谷地区的黄土地震滑坡类型主要分为 3 类: 黄土滑坡、黄土—基岩接触面滑坡、黄土—基岩滑坡。

3.1 纯黄土层内滑坡

黄土层内地震滑坡示意图如图 1 所示, 该类滑坡通常发育于黄土层较厚且坡度较陡的斜坡。地震作用下, 由于地震惯性力的作用及地震过程中坡角瞬间增加^[14], 黄土层内结构遭到破坏, 上层土体自重以及地震惯性力大于土体摩擦阻力。若此时土体开始向下滑动, 则随着地震的发生, 产生黄土层内滑坡。若地震发生时, 土体未明显移动, 仅沿着最危险滑裂面发生小位移量的滑动, 则通常会在后缘留下裂隙。地震后由于再次发生地震或者集中降水沿裂隙渗入, 导致黄土斜坡失稳同样属于黄土层内地震滑坡^[4]。研究表明, 黄土层内地震滑坡具有坡度陡、滑速高、滑距远的特点。

3.2 黄土—基岩接触面滑坡

黄土—基岩接触面滑坡示意图如图 2 所示。该类滑坡区上部分为黄土层, 下为基岩。由于黄土层渗透性强而基岩的渗透性很差, 斜坡受外界因素影响, 如降水沿黄土垂直节理渗入, 接触面的土体抗剪强度降低。地震来临时, 黄土层与基岩接触面产生滑面, 摩擦阻力小于上方土体的自重与地震惯性力时, 发生滑坡。此类滑坡通常坡度较缓, 规模较小。

3.3 黄土—基岩滑坡

黄土—基岩滑体由黄土与基岩组成, 黄土—基岩滑坡指上部黄土层的滑动带动下部基岩一起滑动, 如图 3 所示。由于地震影响, 导致坡体沿软弱面缓慢剪切滑移, 上部土体产生拉张裂缝。斜坡主要依靠软弱面岩层摩擦力支撑以维持平衡, 当岩层地震作用下结构遭到破坏, 致使摩擦阻力难以支持滑体的重力与地震惯性力, 因此产生滑坡^[6]。

3.4 滑坡分类统计

黄土滑坡共计 53 个, 占总滑坡数的 50.5%, 黄土—基岩接触面滑坡 10 个, 占总滑坡数的 9.5%, 黄土—基岩滑坡 42 个, 占总滑坡数的 40.0%。黄土地区地震滑坡分类如图 10 所示。

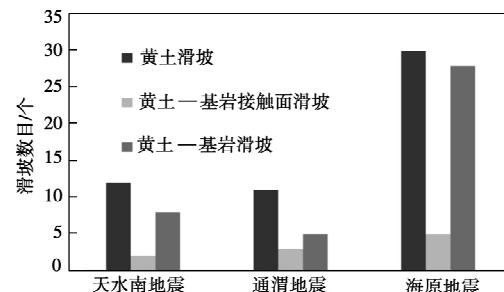


图 10 地震滑坡类型分布

Fig. 10 Distribution of different types of seismic landslides

4 结 论

(1) 受大地构造、地形地貌条件、地震烈度、土层特性等因素的影响, 河谷地区黄土地震滑坡分布多为片状、带状以及线状分布。

(2) 通过分析地震滑坡影响因素, 包括烈度、高差、坡角、土层岩性等, 认为将黄土地区地震滑坡分为以下 3 类更利于研究河谷地区黄土地震滑坡的特征与稳定性: 黄土地震滑坡、黄土—基岩接触面地震滑坡、黄土—基岩地震滑坡。

(3) 黄土具有较高易损性, 在低烈度区由于地震作用也会产生滑坡, 当地震烈度达到 VI 度时会发生大规模滑坡现象。

(4) 单纯的考虑单一因素对黄土地震滑坡影响是

不科学的,只有将多重因素纳入分析和计算的范围中,才可以对地震作用诱发的河谷地区黄土滑坡研究有一个全面的认识。

参考文献:

- [1] 国家地震局兰州地震研究所,宁夏回族自治区地震队.1920年海原大地震[M].北京:地震出版社, 1980. (Lanzhou Institute of Seismology, SSB, Seismic Crew the Ningxia Hui Autonomous Region. Haiyuan earthquake in 1920[M]. Beijing: Seismological Press, 1980. (in Chinese))
- [2] 国家地震局兰州地震研究所. 1985 陕甘宁青四省(区)强地震目录[M]. 西安:陕西科学技术出版社(Lanzhou Institute of Seismology, SSB. Strong earthquake catalogue for Shanxi, Gansu, Ningxia and Qinghai[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, China 1985. (in Chinese))
- [3] 孙崇绍. 西北黄土地区河谷城市地震动参数小区划研究—以兰州为例[J]. 西北地震学报, 2007, **29**(1): 3 - 11. (SUN Chong-shao. Study on the ground motion parameter microzoning for cities in the yellow river valley-taking Lanzhou as an example[J]. Lanzhou: Northwestern Seismological Journal, 2007, **29**(1): 3 - 11. (in Chinese))
- [4] 张振中. 黄土地震灾害预测[M]. 北京: 地震出版社, 1999. (ZHANG Zhen-zhong. The prediction of loess earthquake catastrophe[M]. Beijing: Seismological Press, 1999. (in Chinese))
- [5] 张振中, 郑恒利, 王兰民. 黄土随机振动强度参数在地震滑坡分析中的应用[J]. 西北地震学报, 1991, **13**(3): 45 - 49. (ZHANG Zhen-zhong, ZHENG Heng-li, WANG Lan-min. Application of loess strength parameters under random vibration in analysis of seismic landslides[J]. Lanzhou: Northwestern Seismological Journal, 1991, **13**(3): 45 - 49. (in Chinese))
- [6] 王兰民, 石玉成, 刘旭, 等. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003. (WANG Lan-min, SHI Yu-cheng, LIU Xu, et al. Loess dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese))
- [7] 吴玮江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版, 2006. (WU Wei-jiang, WANG Nian-qin. Landslide disaster in Gansu[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese))
- [8] 王家鼎, 张倬元. 地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(6): 670 - 674. (WANG Jia-ding, ZHANG Zhuo-yuan. A study on the mechanism of high-speed loess landslide induced by earthquake[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 670 - 674. (in Chinese))
- [9] 吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, **13**(2): 36 - 40. (WU Wei-jiang, WANG nian-qin. Basic types and active features of loess landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, **13**(2): 36 - 40. (in Chinese))
- [10] 陈永明, 石玉成, 刘红玫, 等. 黄土地区地震滑坡的分布特征及其影响因素分析[J]. 中国地震, 2005, **21**(2): 235 - 243. (CHEN Yong-ming, SHI Yu-cheng, LIU Hong-mei, et al. Distribution characteristics and influencing factors analysis of seismic loess landslides[J]. China Earthquake, 2005, **21**(2): 235 - 243. (in Chinese))
- [11] 陈永明, 石玉成. 中国西北黄土地区地震滑坡基本特征[J]. 地震研究, 2006, **29**(3): 276 - 280. (CHEN Yong-ming, SHI Yu-cheng. Basic characteristics of seismic landslides in loess area of northwest China[J]. Journal of Seismological Research, 2006, **29**(3): 276 - 280. (in Chinese))
- [12] 王峻. 黄土易损性与地震黄土滑坡关系探讨[J]. 甘肃科学学报, 2008, **20**(2): 36 - 40. (WANG Jun. Discussion on loess vulnerability and seismic loess landslides[J]. Journal of Gansu Sciences, 2008, **20**(2): 36 - 40. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)