

# 泾阳南塬黄土滑坡的运动规律与液化效应

段钊<sup>1,2</sup>, 彭建兵<sup>2</sup>, 王启耀<sup>3</sup>

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** [目的] 查明滑坡的运动特征及其影响因素, 探讨滑坡的运动规律与内在机制, 为区域防灾减灾工作提供理论借鉴。[方法] 以泾阳南塬黄土滑坡为例, 通过现场调查及槽探查明了滑坡的运动特征, 采用统计学方法分析了滑坡的运动规律, 在此基础上, 探讨引起滑坡运动特征分异的“液化效应”。[结果] 按照运动特征将泾阳南塬黄土滑坡划分为流滑型和滑动型两类, 流滑型滑坡的滑距一般为坡高的 4 倍, 滑动型滑坡的滑距约为坡高的 2 倍。1.50×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup> 可近似的认为是研究区内“足以形成最大液化程度的最小滑体体积”。[结论] 滑体体积及边界条件对滑坡运动液化影响显著, 一般情况下滑体体积越大、滑动边界越简单, 运动液化程度就越高, 运动距离也就越远; 而体积越小、滑动边界越复杂, 运动液化程度就越低, 运动距离也就越近。

**关键词:** 运动规律; 液化效应; 统计方法; 黄土滑坡; 泾阳南塬

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)03-0046-04

中图分类号: P642

**文献参数:** 段钊, 彭建兵, 王启耀. 泾阳南塬黄土滑坡运动规律与液化效应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 46-49. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.009

## Motion Law and Liquefaction Effect of Loess Landslides in South Jingyang Plateau

DUAN Zhao<sup>1,2</sup>, PENG Jianbing<sup>2</sup>, WANG Qiyao<sup>3</sup>

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an,

Shaanxi 710054, China; 2. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an,

Shaanxi 710054, China; 3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** [Objective] To discuss the motion law and liquefaction effect by analyzing the motion characteristics and its driving factors of loess landslides in order to provide theoretical references for hazard prevention and treatment in landslide areas. [Methods] The loess landslide in South Jingyang plateau was chosen to research the motion law of landslide by site investigating, trench excavating, and statistical analysis. Based on the above works, the influences of liquefaction effects on motion characteristics were discussed. [Results] According to the motion characteristics, the landslide in South Jingyang plateau was classified into two types: flowslide and slide. In the flowslide type, the sliding distance was four times of slope height, while the sliding distance was two times of slope height in the slide type. The minimum landslide volume that was sufficient to produce the greatest degree of liquefaction was about 1.50×10<sup>5</sup> m<sup>3</sup> in study area. [Conclusion] Greater volume and simpler sliding boundary of landslide will improve flow motion, vice versa.

**Keywords:** motion law; liquefaction effect; statistical methods; loess landslide; South Jingyang plateau

滑坡因破坏力强、至灾后果严重, 已成为中国最具代表性的地质灾害问题<sup>[1]</sup>。受各类因素影响, 滑坡在下滑过程中表现出差异的运动特征, 因此其至灾范围一般难以准确预测。国内外学者为把握滑坡的运

动规律, 多通过统计学方法对其运动特征进行分析。Hsu<sup>[2]</sup>在 Heim“雪橇”模型的基础上进行了改进, 并通过统计发现超额位移与碎屑流规模存在的线性关系; Zambrano<sup>[3]</sup>在前者的基础上, 提出了更加合理的

收稿日期: 2015-05-12

修回日期: 2015-06-29

资助项目: 国家重点基础发展计划(973 计划)项目“黄土重大灾害及灾害链的发生、演化机制与防控理论”(2014CB744702); 中国地质调查局项目“泾河南岸泾阳段黄土滑坡调查评价”(12120114036001); 西安科技大学博士启动金项目“高速远程黄土滑坡运动机理研究”(2014QDJ029)

第一作者: 段钊(1985—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 讲师, 主要从事黄土滑坡机理及黄土力学行为研究。E-mail: landsliders@126.com。

通讯作者: 彭建兵(1953—), 男(汉族), 湖北省麻城市人, 博士, 教授, 主要从事地质灾害的教学与科研工作。E-mail: dicexy\_1@chd.edu.cn。

滑坡运动学模型以预测滑坡的运动速度; Davies<sup>[4]</sup>对世界上 26 起体积超过  $1.00 \times 10^7 \text{ m}^3$  的高速远程滑坡进行统计分析, 得出了滑坡运动距离与体积的经验关系式; 黄润秋等<sup>[5]</sup>对汶川地震诱发的滑坡进行统计发现, 该类滑坡具有显著的“低倾角”特征, 且滑坡体积与滑坡斜率呈现出对数关系; 许领等<sup>[6]</sup>对泾阳南塬黄土滑坡的运动特征进行统计分析发现, 该类滑坡的运动特征受运动液化程度影响显著; 樊成意等<sup>[7]</sup>以台塬型黄土滑坡为研究对象, 分析了台缘地区滑坡滑动距离与滑体各参数的关系, 结果表明滑距与滑体体积、宽度及厚度的关系较为明显。刘维等<sup>[8]</sup>以海源大地震诱发的黄土滑坡为例, 通过单因素分析及多元回归方法推导出了滑距的预测公式。李鹏岳等<sup>[9]</sup>以川西高原赵玛滑坡为例, 对其发育特征及失稳过程进行了分析, 并推导出了滑坡的最大运动速度。此外, 王念秦等<sup>[10]</sup>、李秀珍等<sup>[11]</sup>、董书宁等<sup>[12]</sup>学者也通过经验统计方法对不同地区的高速远程滑坡运动特征进行了统计分析, 并取得了非常有意义的结论。

自 1976 年至今, 受人工灌溉活动影响, 泾阳南塬先后发生黄土滑坡 58 起, 曾造成严重的人员伤亡和经济财产损失<sup>[13]</sup>。目前研究已基本阐明了泾阳南塬黄土滑坡的诱发机制<sup>[14-15]</sup>, 但滑坡在复杂边界条件下的运动规律尚不明确, 这无疑增加了泾阳地区滑坡预防工作的难度; 同时, 因区内滑坡近期表现出的高发趋势, 更使得滑坡致灾风险进一步升高。为此, 本文以该群类黄土滑坡为研究对象, 通过现场调查及槽探查明滑坡的运动特征, 并采用统计学方法分析滑坡的运动规律, 在此基础上探讨滑坡的运动机制, 以期为区域防灾减灾工作提供绵薄的理论借鉴。

## 1 泾阳南塬黄土滑坡类型与发育特征

考虑到与致灾后果密切相关的滑坡运动特征作为依据, 将泾阳南塬黄土滑坡划分为流滑型和滑动型两类。

(1) 流滑型黄土滑坡。流滑型黄土滑坡形成于塬区地下水位埋藏较浅的地带, 受人工灌溉影响显著, 多为塬边斜坡初次破坏形成。该类黄土滑坡具有体积大、破坏性强、致灾范围广等特点, 是典型的高速远程滑坡, 在研究区共发生 26 起, 占区内滑坡总数的 45%。事实上, 流滑型黄土滑坡在运动过程中产生了强烈的液化作用。通过对典型滑坡开挖探槽发现, 滑坡的下垫面—阶地滑床中粉土(砂)层液化现象十分显著, 而并非单一的滑体底部液化(黄土层内), 这也表明该类滑坡的运动机制更为复杂。此外, 由于该类滑坡运动距离较远, 滑体多脱离斜坡滑床堆积, 使斜

坡脚常形成洼地而缺乏支撑, 受灌溉活动进一步影响, 滑坡后缘易再次失稳, 形成多序次破坏。

(2) 滑动型黄土滑坡。滑动型与流滑型黄土滑坡的诱发因素相同, 但发育规模相对较小, 多为老滑坡后缘的再次破坏。滑动型黄土滑坡在运动过程中受体积及边界条件影响, 运动液化程度较低(通过探槽开挖发现该类滑坡并无显著的滑带土液化现象), 因此其运动距离相对较近, 且运动停止后滑体多依附于斜坡滑床或披覆于老滑体之上堆积。此外, 该类滑坡还表现出潜伏期短、滑体结构完整等特点, 在研究区共发生 32 起, 占滑坡总数的 55%。

## 2 滑坡运动规律分析

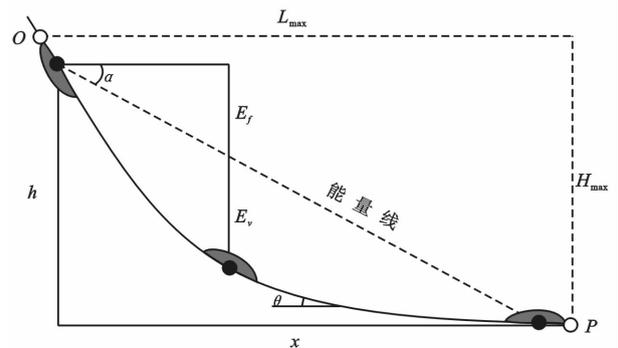
### 2.1 基本理论

对于滑坡运动特征的分析, 可采用 Hsu 改进的“雪橇”模型, 其公式为:

$$\tan\varphi_a = \frac{H_{\max}}{L_{\max}} \quad (1)$$

式中:  $\tan\varphi_a$ ——滑坡斜率;  $\varphi_a$ ——等效摩擦角( $^\circ$ );  $H_{\max}$ ——最大垂直距离(m), 以下简称坡高;  $L_{\max}$ ——最大水平距离(m), 以下简称滑距。下同。

实际上  $\varphi_a$  为一种经验参数, 而并非真正的摩擦角, 因此, 可用滑坡斜率  $\tan\varphi_a$  来判断滑坡在下滑过程中是否发生液化。当  $\varphi_a < \alpha$  时, 滑坡在运动过程中便会产生额外的运动距离, 说明滑坡在运动过程中产生“液化效应”从而降低了摩擦阻力。通过调查发现, 研究区内黄土滑坡坡高  $H_{\max}$  接近且普遍偏低, 一般在 60~70 m, 而滑距  $L_{\max}$  差异较大, 范围在 70~310 m。假设区内滑坡坡高相同, 滑距越大, 则能量线上移, 滑坡在运动过程中能量损失  $E_f$  越小, 动能  $E_v$  就越大, 滑坡液化程度就越剧烈(图 1)。



注: O 为起始端点; P 为终止端点;  $\alpha$  为滑体内摩擦角;  $\theta$  为滑动面夹角; ● 为质心;  $x, h$  分别为 Heim“雪橇”模型中最大水平、垂直距离;  $L_{\max}, H_{\max}$  为改进的“雪橇模型”中最大水平、垂直距离;  $E_f$  为能量损失;  $E_v$  为动能。

图 1 黄土滑坡滑动过程能量分析

对区内黄土滑坡的坡高和滑距进行了测量、统计,结果如图 2 所示。从图 2 中的拟合线可以看出,不同滑坡类型具有其相应的斜率范围,如流滑型黄土滑坡的拟合线为  $H=0.23L$ ,滑动型黄土滑坡的拟合线为  $H=0.55L$ ,而  $H=0.35L$  可以近似看作流滑型和滑动型黄土滑坡的判断依据。

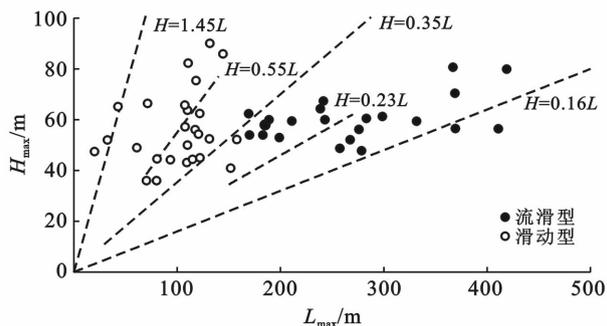


图 2 黄土滑坡坡高与滑距关系

进一步对区内黄土滑坡的滑坡斜率 ( $\tan\varphi_a < 1.0$ ) 与发生频次关系统计发现(图 3),两类黄土滑坡的滑坡斜率均表现为正态分布特征。其中液化更为剧烈的流滑型黄土滑坡主要集中在  $0.2 \sim 0.3$  ( $\varphi_a$  约  $11.3^\circ \sim 16.7^\circ$ ),即该类滑坡的滑距约为坡高的 4 倍;而液化程度相对较低的滑动型黄土滑坡由于边界条件复杂,滑坡斜率分布较为分散,高频次主要集中在  $0.4 \sim 0.6$  ( $\varphi_a$  约  $21.8^\circ \sim 30.9^\circ$ ),即滑距约为坡高的 2 倍。

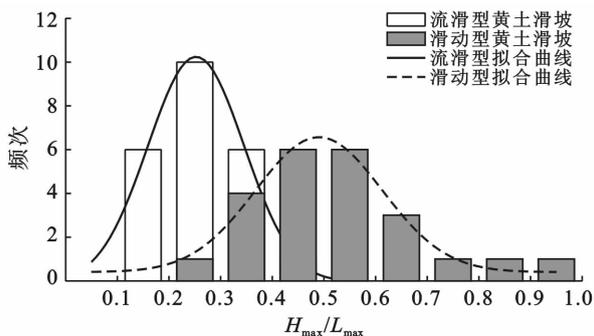


图 3 滑坡斜率与发生频次关系

## 2.2 滑体体积对运动特征的影响

滑坡斜率与滑体体积表现为对数关系(见图 4)。当体积较小时,滑坡斜率随着体积的增大显著降低;当体积接近于  $1.50 \times 10^5 \text{ m}^3$  时,曲线出现明显拐点;拐点以后,随着体积的继续增大,滑坡斜率表现出收敛趋势。滑坡斜率与体积的关系特征表明,研究区内黄土滑坡体积接近于  $1.50 \times 10^5 \text{ m}^3$  时就足以形成较小的滑坡斜率,并形成较远的滑距(斜坡坡高接近),因此这一“阈值”可以近似地认为是“足以形成最

大液化程度的最小滑体体积”。同样也可以理解为,在坡高一致时,大于该规模的体积增量并不会造成更深程度的液化和更远的滑动距离,而超出的这部分体积可以认为是一种“失距”的表现。对曲线进行拟合可以得到其关系式:

$$\tan\varphi_a = \frac{H_{\max}}{L_{\max}} = 7.380V^{-0.510} \quad (2)$$

式中:  $V$ ——滑体体积。

将横坐标对数化,得到的关系曲线,发现曲线基本呈线性关系,其相关方程为:

$$\tan\varphi_a = \frac{H_{\max}}{L_{\max}} = 4.784 - 1.645\lg V \quad (3)$$

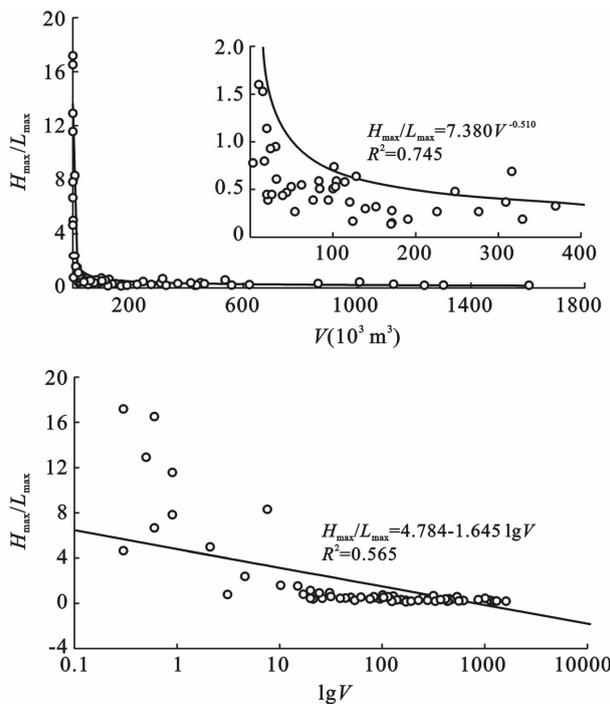


图 4 滑坡斜率与体积的关系

可见,研究区黄土滑坡的滑坡斜率与体积规模相关性极为密切,滑坡斜率可由体积确定。如果滑坡坡高已知,那么就可通过滑坡斜率并结合体积计算出滑距。

## 3 液化效应

通过现场调查发现,泾阳南塬两类黄土滑坡由于诱发因素相同,滑体在脱离斜坡滑床前运动机制单一且一致,但当滑体脱离斜坡滑床后,由于体积及边界条件差异,滑坡运动特征表现出显著的分异现象。

(1) 体积差异。通过对比滑体体积发现,流滑型黄土滑坡体积相对较大,范围在  $1.00 \times 10^5 \sim 1.60 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,其中  $5.00 \times 10^5 \text{ m}^3$  以下较为集中,总占比约为 70% (19 起);而滑动型黄土滑坡体积相对较小,范围在  $5.00 \times 10^3 \sim 5.00 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,其中  $1.50 \times 10^5 \text{ m}^3$

以下较为集中,总占比约为85%(27起)。按照上述分析得到的“阈值”为标准,流滑型黄土滑坡体积多高于这一标准,而滑动型黄土滑坡体积多在这一标准以下。

(2) 边界条件差异。一般情况下,流滑型黄土滑坡在脱离斜坡滑床后会直接与阶地地层接触;但滑动型黄土滑坡多为老滑坡后缘的再次破坏,因此滑坡在脱离斜坡滑床后则多会披覆于坡脚的老滑体之上。

综上所述,当斜坡初次破坏且形成的滑坡体积较大时,滑体可产生足够的冲击力以击穿阶地表面非饱和和堆积层并与下垫松散、饱和粉土(砂)层接触。当滑体底部与下垫层挤压交错所形成的饱和复合滑带,在

封闭、高速剪切环境下发生体缩、颗粒定向排列等结构变化,滑带土中孔隙水压力将不断升高,最终液化,进而滑坡滑动阻力显著降低,形成较远的运动距离(见图5a);反之,当斜坡初次破坏但形成的滑坡体积较小或为老滑坡后缘的再次破坏,那么新滑坡会因冲击力不足而难以击穿坡脚厚实的老滑体与饱和下垫层接触。此外,由于下伏老滑体表面起伏、反翘,后期形成的滑坡在运动过程中会形成较大的摩擦阻力,而且会因下伏老滑体的起伏“架空”结构致使剪切面封闭度低。在如此剪切环境下,滑带土孔压增幅小、消散快,液化程度低,因此滑坡运动距离也一般较近(见图5b)。

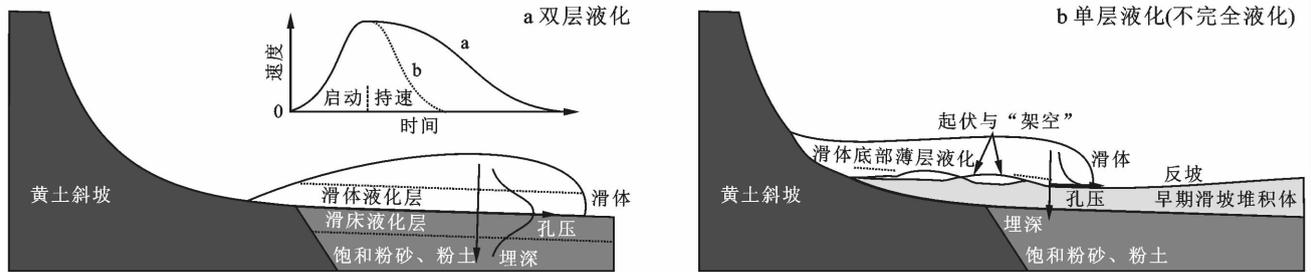


图5 黄土滑坡液化模式

## 4 结论

(1) 泾阳南塬黄土滑坡按运动特征可划分为流滑型黄土滑坡和滑动型黄土滑坡两类。其中流滑型黄土滑坡共发生26起,占滑坡总数的45%,滑动型黄土滑坡共发生32起,占滑坡总数的55%。

(2) 泾阳南塬黄土滑坡运动特征具有显著的分异性。流滑型黄土滑坡坡高与滑距的拟合曲线为  $H=0.23L$ , 滑坡斜率集中在  $0.2\sim 0.3$ , 即滑坡的滑距约为坡高的4倍;滑动型黄土滑坡坡高与滑距的拟合曲线为  $H=0.55L$ , 滑坡斜率集中在  $0.4\sim 0.6$ , 即该类滑坡的滑距约为坡高的2倍;  $H=0.35L$  可以近似看作为区内黄土滑坡的类型判别依据。  $1.50\times 10^5\text{ m}^3$  可近似的认为是研究区内“足以形成最大液化程度的最小滑体体积”。

(3) 滑体体积及边界条件对滑坡运动液化影响显著,一般情况下体积越大、滑动边界越简单(斜坡初次破坏),滑坡运动液化程度越高;体积越小、滑动边界越复杂(斜坡多次破坏),滑坡运动液化程度越低。

### 【参考文献】

[1] 徐张建,林在贯,张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312.  
 [2] Hsu K J. Catastrophic debris streams(sturzstroms) generated by rockfalls[J]. Geological Society of America Bulletin, 1975, 86(1): 129-140.  
 [3] Zambrano O M. Large rock avalanches; a kinematic model[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008,

26(3): 283-287.

[4] Davies T R H. Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1982, 15(1): 9-24.  
 [5] 黄润秋,许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
 [6] 许领,戴福初. 泾阳南塬黄土滑坡特征参数统计分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(5): 28-32.  
 [7] 樊成意,梁收运. 黄土台缘滑坡滑距与滑体形态的关系分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(1): 18-24.  
 [8] 刘维,裴向军,蒲丹. 海原地震诱发黄土滑坡的运动影响因素及滑距研究[J]. 路基工程, 2014, 14(2): 40-48.  
 [9] 李鹏岳,铁永波,王东辉,等. 川西高原冻融型高速滑坡特征与成因分析[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 173-177.  
 [10] 王念秦,张倬元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2005.  
 [11] 李秀珍,孔纪名. “5·12”汶川地震诱发滑坡的滑动距离预测[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(5): 243-249.  
 [12] 董书宁,李保雄. 黄土滑坡的空间预报[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(6): 46-47.  
 [13] 段钊. 黄土滑坡触发机理研究: 以泾河下游南岸黄土塬区滑坡为例[D]. 西安: 长安大学, 2013.  
 [14] 金艳丽,戴福初. 灌溉诱发黄土滑坡机理研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1493-1499.  
 [15] Xu Ling, Dai Fuchu, Tham G L. Landslides in the transitional slopes between a loess platform and river terrace, Northwest China[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2011, 152(3): 267-279.