

文章编号: 1108 - 2786 - ( 2016 ) 1 - 71 - 06

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000102

# 泾阳南塬多序次黄土滑坡特征参数与成因

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:** 泾阳南塬黄土滑坡表现出典型的多序次破坏特征,已造成了严重的土地资源损失及经济林地破坏。以泾阳南塬多序次黄土滑坡为研究对象,根据现场调查结果对黄土滑坡的多序次特征参数进行统计分析发现,随滑动序次的增加,滑坡表现出体积递减、滑距缩短、剪出口升高以及后缘两侧易滑等特征。进一步通过剪切试验及数值仿真实验,对滑坡的多序次成因机制进行了初步探讨,结果表明:灌溉导致地下水位持续上升是研究区黄土滑坡形成的主要原因,其力学机制可概括为土体在排水条件下,因孔压激增引发不完全排水行为,从而发生的静态剪缩破坏;前序次滑坡的形成改变了斜坡原有的结构形态,为后序次滑坡的孕育和发展提供了良好的滑动条件,主要表现在堵水促滑、凸坡促滑以及液化分异三方面影响。

**关键词:** 特征参数;成因机制;剪切试验;黄土滑坡;泾阳南塬

**中图分类号:** P642. 22

**文献标志码:** A

泾阳南塬位于陕西省泾阳县泾河下游右岸,系渭北咸阳凸起北缘斜坡带,为丝绸之路经济带西安自由贸易试验区及西安国际港务区的核心地带。受大规模农业灌溉影响,自 1976 年至今,泾阳南塬先后发生黄土滑坡 80 余起,已致 31 人死 25 伤,掩埋房屋上百间,土地损失多达数千亩<sup>[1]</sup> (1 亩 = 0. 067 km<sup>2</sup>)。目前关于泾阳南塬黄土滑坡的研究主要集中在滑坡类型与区域分布特点<sup>[2-5]</sup>、滑坡基本特征<sup>[6-7]</sup>、单体滑坡机理<sup>[8-12]</sup>、稳定性评价<sup>[13-15]</sup>等方面,这些成果为泾阳南塬地区地质灾害防治工作提供了十分重要的理论借鉴,从一定程度上推动了该地区的防灾减灾工作。尤其在最近十年,泾阳南塬黄土滑坡的致灾表现发生了显著的变化,单体黄土滑坡的伤亡性致灾后果显著减弱,取而代之的是同一塬段斜坡发生多序次“溯源”滑动从而引发的土

地资源损失及经济林地破坏等问题(图 1)。

本文以泾阳南塬多序次黄土滑坡为研究对象,在总结前人成果的基础上,结合现场调查及遥感解译资料,对滑坡的特征参数与序次关系进行了统计分析,并通过力学试验、数值分析等方法对滑坡的多序次成因机制进行了探讨,以期为该群类黄土滑坡的研究提供与防治提供绵薄的理论借鉴。

## 1 多序次滑坡特征参数统计分析

通过现场调查及遥感解译发现,泾阳南塬有 14 处斜坡发生过多序次破坏,共形成 35 起以上滑动,其中发生过 2 起以上滑动的 14 处,3 起以上的 6 处,4 起的 2 处(统计未考虑特征已缺失的滑坡及体积在  $0.5 \times 10^4 \text{ m}^3$  以下的小型滑坡)。本文分别选

收稿日期( Received date ): 2015 - 08 - 31; 改回日期( Accepted ): 2015 - 09 - 14。

基金项目( Foundation item ): 中国地质调查局项目( 12120114036001 )、西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室开放基金项目( 310826151137 )和西安科技大学博士启动金项目( 2014QDJ029 )。[ Supported by the China Geological Survey Project ( 12120114036001 ), the Open Foundation of Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering Ministry of MOE ( 310826151137 ) and the Start Foundation of Xi'an University of Science and Technology ( 2014QDJ029 ) . ]

作者简介( Biography ): 段钊( 1985 - ),男,陕西西安人,博士,讲师,主要从事黄土滑坡机理研究。[ Duan Zhao ( 1985 - ), male, lecturer, PH. D., engaged in the mechanism of loess landslides. ] E - mail: landsliders@ 126. com



图1 典型多序次黄土滑坡西庙店滑坡

Fig. 1 Typical repeatedly failure loess landslide

取滑坡体积、滑坡水平滑距、剪出口位置、后缘破坏位置等4项滑坡特征参数作为指标,就各参数与滑动序次的关系进行统计分析。

### 1.1 体积

滑坡的体积越大,滑动次数越多,土地损失就越严重。研究区多序次黄土滑坡体积范围在  $0.6 \sim 123.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,多为中型滑坡(19起)。其中第1起滑动体积范围在  $8.4 \sim 123.6 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,第2起在  $0.8 \sim 80.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,第3起在  $0.6 \sim 6.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,发生过第4起滑动的多序次黄土滑坡分别为 L3-4 和 L14-4,体积为  $1.5$  和  $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图2)。从整体来看,随着滑动序次的增加滑坡体积呈递减趋势,尤其当第一起滑动体积越大,这一规律越显著。

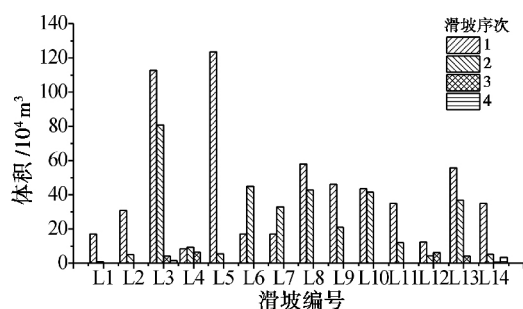


图2 滑坡序次与体积关系

Fig. 2 Relationship between failure order and volume of loess landslides

### 1.2 水平滑距

滑坡的水平滑距直接影响其致灾范围。虽然泾阳南塬斜坡带坡高变化较小(高  $60 \sim 70 \text{ m}$ ),但滑坡的水平滑距差异十分显著。研究区多序次黄土滑坡水平滑距范围在  $27.5 \sim 410.9 \text{ m}$ ,其中第1起滑动的滑距范围在  $121.8 \sim 410.9 \text{ m}$ ,第2起在  $27.5 \sim 275.9 \text{ m}$ ,第3起在  $45.0 \sim 218.0 \text{ m}$ ,第4起分别为  $210.0 \text{ m}$  和  $135.2 \text{ m}$ (图3)。可见,滑坡水平滑距随

着滑动序次的增加明显缩短。一般情况下,水平滑距受体积影响较为显著,体积越大滑动距离越远,这种规律在第1起滑动中最为显著,但有时也会因滑动条件的变化大体积滑坡表现出“失距”现象<sup>[16]</sup>,如 L3-1。

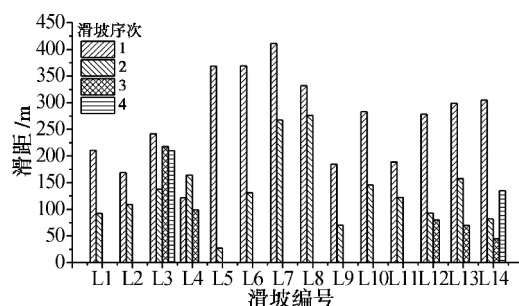


图3 滑坡序次与滑距关系

Fig. 3 Relationship between failure order and sliding distance of loess landslides

### 1.3 剪出口位置

泾阳南塬塬面高程在  $440 \sim 470 \text{ m}$ ,阶地高程在  $380 \sim 400 \text{ m}$ 。受区内灌溉影响,塬边斜坡带地下水位埋藏较浅,坡脚黄土在动静水压力影响下强度发生劣化,因此斜坡首次失稳时,滑体往往从坡脚深处剪出,且剪出口多位于阶地面以下,随着随着滑动序次的增加剪出口位置会逐渐升高(图4)。滑坡剪出口位置一般随斜坡带地下水位的变化而变化,但也会受到后缘残余裂缝影响。

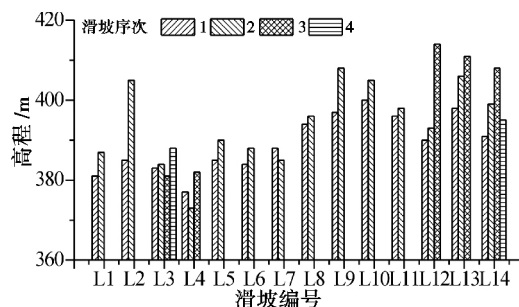


图4 滑坡序次与剪出口关系

Fig. 4 Relationship between failure order and shear outlet elevation of loess landslides

### 1.4 后缘破坏位置

研究区多序次黄土滑坡在形成演化过程中,后序次滑动的破坏位置具有一定的规律性。其中第2起滑坡的破坏位置有6处发生在第1起滑坡的后缘中部(总占比43%),其余8处发生在发生在第1起

滑坡后缘两侧斜坡位置(总占比 57%);第3起及后序次形成的滑坡均发生在前一序次滑坡后缘两侧斜坡位置,如 L14-3、L14-4。

## 2 滑坡多序次成因

### 2.1 灌溉诱滑

灌溉导致地下水位持续上升是研究区黄土滑坡形成的主要原因,可通过常剪应力三轴排水剪切试验(CSD 应力路径试验)中土体的剪切行为加以解释。该试验是在偏应力为定值的条件下,通过增加孔压的方式不断降低平均有效应力的排水剪切过程(即升高有效应力比  $\sigma'_1/\sigma'_3$  的剪切过程)。因此,本文选取泾阳南塬典型斜坡坡脚 Q<sub>2</sub> 黄土进行 CSD 应力路径试验,试验结果见图 5。从试验曲线可以看出,当孔压处于低水平时,土体在较长的增(孔)压剪切过程中仅表现出微弱的轴向应变(小于 0.8%);随着孔压的进一步升高,土体达到极限应力状态,体变突然增大,土体出现剪缩,孔压突然升上 5~8 kPa,随之发生剪切破坏,在很小的孔压增幅条件下便形成较大的轴向变形。可见,即使在排水条件下,土体也会因孔压的激增发生不完全排水的静态剪缩破坏。

此外,CSD3 应力路径曲线在孔压升高过半时出现了显著的应变台阶,说明土体在高应力状态条件下,有可能因孔压升高而发生局部变形,这种局部变形的产生使土体达到一个新的平衡阶段,应变速率在此时显著降低。土体阶段式的由变形、到收敛、再到变形直至破坏的过程,可从一定程度上解释研究区黄土滑坡后缘(或斜坡坡顶)多级沉降平台和裂缝的成因,以及沉降平台能在短期内保持稳定的现象(图 6)。

### 2.2 地形变促滑

#### 2.2.1 堵水促滑效应

受长期农业灌溉影响,泾阳南塬斜坡带地下水位(潜水)埋藏较浅,部分斜坡坡脚甚至有泉水出露。当斜坡破坏所形成的黄土滑坡堆积于坡脚时,坡脚处地下水会因排泄不畅而发生局部雍高、富集等现象,而且这一现象会随着灌溉作用的持续或堆积体的固结密实变得更为显著,如图 7 所示。滑坡堆积体通过“堵水”,使得斜坡带地下水动力条件发生改变,优化了地下水上升环境,从一定程度上加剧了后序次滑坡的孕育和发展。虽然滑坡堆积体造成

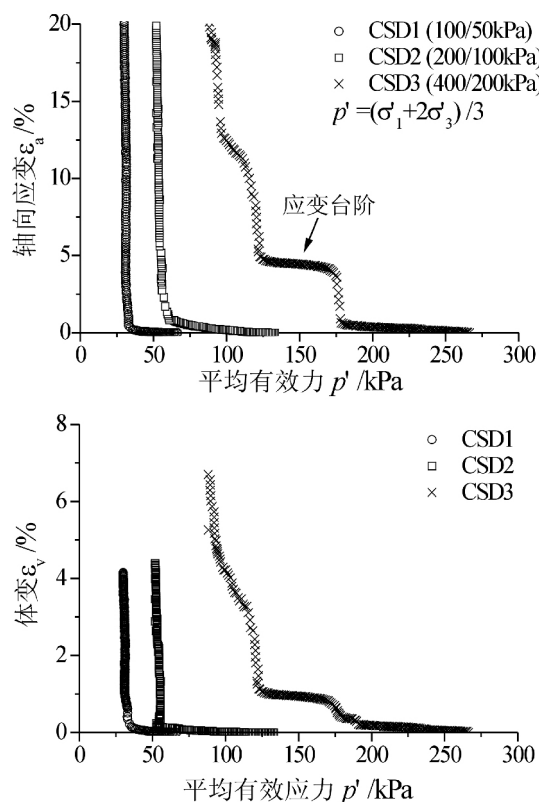


图 5 CSD 应力路径试验曲线

Fig. 5 Results of CSD tests

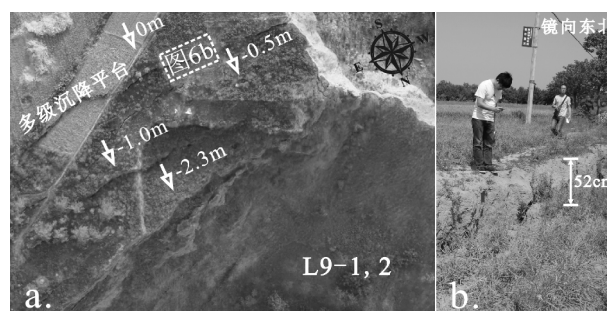


图 6 L9 滑坡后缘沉降平台与裂缝

Fig. 6 Settlement terrace and joint of L9 loess landslide

了地下水雍高、富集,但同时也反压于坡脚,因此,在前序次滑坡后缘残余裂缝的控制下,后序次滑动剪出口也会逐渐升高。

#### 2.2.2 凸坡促滑效应

斜坡发生失稳后,会因土体缺失而在滑坡两侧斜坡处形成“凸坡”地形。通过 FLAC3D 数值仿真建模(考虑水位影响),对比泾阳南塬黄土斜坡滑动前、后地形发现,“凸坡”为后序次滑坡的形成提供了良好的地形条件,主要表现在以下 3 个方面:①原斜坡带塑性剪切区均匀分布于坡脚,当斜坡发生滑

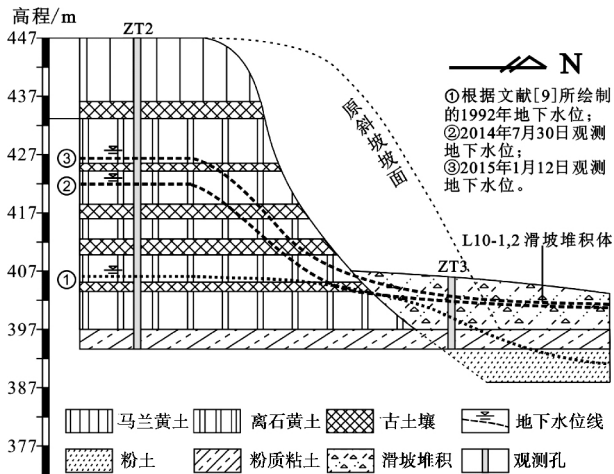


图7 寨头滑坡(L10)地下水位观测结果

Fig. 7 Underground water level observations of Zaitou loess landslide

动后,塑性剪切区集中于“凸坡”坡脚,而拉张塑性区也更向“凸坡”坡肩迁移,见图8(a)。②滑后地形改变了斜坡原有的应力分布状态,“凸坡”坡脚处因缺乏水平向支撑,压应力集中,增量明显且影响范围增大,见图8(b)。③原斜坡坡脚水平位移量较小(最大约1 m),斜坡发生滑动后,受坡顶拉张应力及卸荷作用影响,大变形区向滑坡后壁偏移(最大位移约3.5 m),见图8(c)。

可见,斜坡发生滑动后,“凸坡”坡脚是滑后地形中应力最为集中、最易发生塑性破坏的区域,如果前序次滑坡规模越大,“凸坡”临空面越大,发生后序次滑动的概率也就越高。另一方面,受黄土垂直节理(裂隙)与坡脚地下水控制,滑坡会形成上陡下缓的“L”形滑面,因此在滑坡发生后,后缘坡肩处一般拉张应力较为集中,在坡脚雍水及后缘残余裂缝影响下,也易发生小规模黄土滑坡。

### 2.2.3 液化分异效应

滑坡的水平滑距受运动液化模式影响显著。当斜坡初次破坏且滑坡体积较大时,滑坡拥有足够的动能以击穿阶地薄层堆积层与饱和、松散粉土下垫层接触,加之受长期灌溉影响滑体底部饱水,滑坡在水平阶地上运动的过程中滑动面附近土体饱和度高、强度低。在闭合、高速剪切环境下,滑带土会发生体缩、颗粒定向排列等结构变化,形成了较高且难以消散的超孔隙水压力,从而形成较远的滑动距离,见图9a;反之,当斜坡初次破坏但滑坡体积较小时,或为后序次滑动,那么滑坡将难以产生足够的动能和冲击力来击穿坡脚厚实的堆积体与粉土下垫层接触。另一方面,由于下伏堆积体表面起伏、反翘,后

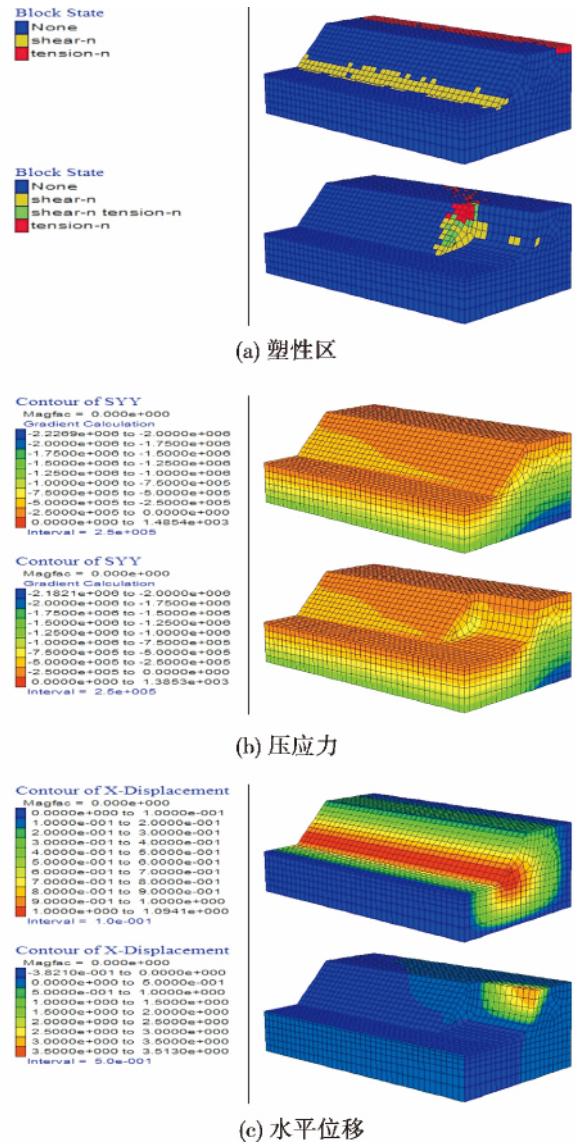


图8 斜坡破坏前后数值模拟对比

Fig. 8 Failure before and after comparison of slope by FLAC3D

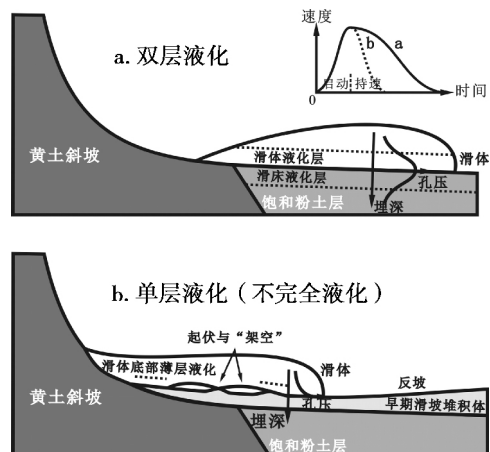


图9 黄土滑坡运动液化模式

Fig. 9 Liquefaction model of loess landslides

序次滑坡在滑动过程中不仅会形成较大的摩擦阻力,而且会因下伏堆积体的起伏形成“架空”结构,这样剪切面难以闭合,滑带土孔压增幅小、消散快,液化程度低,因此滑动距离也一般较近,见图9b。

### 3 结论

1) 泾阳南塬有14处斜坡发生过多序次破坏,共形成35起以上滑动。通过调查发现,随着滑动序次的增加,该群类黄土滑坡表现出体积递减、滑距缩短、剪出口升高以及后缘两侧易滑等特征。

2) 灌溉导致地下水位持续上升是研究区黄土滑坡形成的主要原因,其力学机制可概括为土体在排水条件下,因孔压激增引发不完全排水行为,从而发生的静态剪缩破坏。黄土滑坡后缘沉降平台和裂缝的形成可认为是土体在CSD应力路径条件下应变收敛的一种表现。

3) 前序次滑坡的形成改变了斜坡原有的结构形态,为后序次滑坡的孕育和发展提供了良好的滑动条件,主要表现在堵水促滑、凸坡促滑以及液化分异3方面影响。

### 参考文献(References)

- [1] 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. [Duan Zhao. Study on the trigger mechanism of loess landslide—a case study of the loess landslide in the south bank of lower Jing River[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.]
- [2] 王德耀, 杜忠潮, 长满社. 陕西省泾阳南塬崩塌、滑坡地质灾害及成因分析[J]. 水土保持通报, 2004, 24(4): 34–37 [Wang Deyao, DU Zhongchao, Zhang manshe. Geological hazard of cliff collapse, landslide and their occurrence in southern Jingyang County of Shaanxi province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(4): 34–37]
- [3] 范立民, 岳明, 冉广庆. 泾河南岸崩岸型滑坡的发育规律[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(5): 33–35 [Fan Limin, Yue Ming, Ran Guangqing. Development pattern of slumping bank type landslides at the south bank of Jinghe, Shaanxi Province[J]. Coal Geology of China, 2004, 16(5): 33–35]
- [4] 许领, 戴福初, 闵弘, 等. 泾阳南塬黄土滑坡类型与发育特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2010, 35(1): 155–160 [Xu Ling, Dai Fuchu, Min Hong, et al. Loess landslide types and topographic features at south Jingyang plateau, China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geoscience, 2010, 35(1): 155–160]
- [5] 段钊, 李文可, 王启耀. 泾河下游台塬区黄土滑坡类型与时空分布规律[J]. 西安科技大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 369–375 [Duan Zhao, Li Wenke, Wang Qiyao. Types and spatial-temporal distribution of loess landslides in the south plateau of lower Jing river[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 35(3): 369–375]
- [6] 许领, 李宏杰, 吴多贤. 黄土台缘滑坡地表水入渗问题分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2008, 19(2): 28–32 [Xu Ling, Li Hongjie, Wu Duoxian. Discussion on infiltration of surface water and their significance to terrace loess landslides[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(2): 28–32]
- [7] 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 [Xu Ling, Dai Fuchu. Statistical analysis of the characteristic parameters of loess landslides at the south Jingyang plateau[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(5): 28–32]
- [8] 雷祥义. 陕西泾阳南塬黄土滑坡灾害与引水灌溉的关系[J]. 工程地质学报, 1995, 3(1): 56–64 [Lei Xiangyi. The hazards of loess landslides in the southern tableland of Jingyang county, Shaanxi and their relationship with the channel water into fields[J]. Journal of Engineering Geology, 1995, 3(1): 56–64]
- [9] 金艳丽, 戴福初. 饱和黄土静态液化特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(12): 3294–3298 [Jin Yanli, Dai Fuchu. Experimental investigation of static liquefaction of saturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3294–3298]
- [10] 金艳丽. 地下水位上升造成的黄土远程滑坡形成机理及数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2007. [Jin Yanli. Causative mechanism and numerical modeling of long-runout loess landslides caused by rise in groundwater table[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2007.]
- [11] Xu Ling, Dai Fuchu, Tham L G., et al. Landslides in the transitional slopes between a loess platform and river terrace, northwest China[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2011, X V II (No.3): 267–279
- [12] 杨璠, 常维, 汪发武, 等. 陕西泾阳东风高速远程黄土滑坡运动过程的模拟[J]. 工程地质学报, 2014, 22(5): 890–896 [Yang Pan, Chang Wei, Wang Fawu, et al. Motion simulation of rapid long run-out loess landslide at Dongfeng Jingyang, Shaanxi[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(5): 890–896]
- [13] 黄玉华, 雷祥义. 模糊信息优化处理方法在陕西泾阳南塬斜坡稳定性区划中的应用[J]. 灾害学, 2005, 20(4): 47–56 [Huang Yuhua, Lei Xiangyi. Applications of the method of fuzzy information optimization processing in estimation of slope stability of Jingyang Southern Yuan of Shannxi[J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(4): 47–56]
- [14] 桑广书, 冯利华, 商丽华. 泾河下游南岸台塬边坡稳定性与滑坡诱因分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 187–191 [Sang Guangshu, Feng Lihua, Shang Lihua. Study on stability of tableland slopes and causes for landslides on southern-bank of lower reaches of Jinghe River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(5): 187–191]
- [15] 廖红建, 李涛, 彭建兵. 高陡边坡滑坡体黄土的强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1939–1944 [Liao Hongjian, Li

Tao ,Peng Jianbin. Study of strength characteristics of high and steep slope landslide mass loess [J]. Rock and Soil Mechanics , 2011 ,32( 7) : 1939 – 1944 ]

[16] 黄润秋 ,许强. 中国典型灾难性滑坡 [M]. 北京: 科学出版社 , 2008: 237 – 241 [Huang Runqiu , Xu Qiang. Catastrophic landslides in China [M]. Beijing: Science Press ,2008: 237 – 241 ]

## Characteristic Parameter and Formation Mechanism of Repeatedly Failure Loess Landslides

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 710054 China;

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

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

**Abstract:** The loess landslides have caused serious land resources loss and economic forest destruction in South Jingyang Plateau of west China with repeatedly failure characteristics. In this paper , taking the repeatedly failure loess landslide as the research object. Through the statistical analysis of the survey results we find that the landslides shows successive characteristics changes with increasing failure order , such as volume reduction , sliding distance shorten , shear outlet rise and easy to slide on the side of slope. Through shear test and numerical simulations , we discussed the formation mechanism of the repeatedly failure loess landslide , the results as follow: The main reason is the rise of ground water level caused by irrigation , its mechanics can be summarized as the static shear failure due to pore water pressure increases suddenly occurred in loess samples under drained conditions; The former landslides changes the structural forms of slope which providing a good sliding conditions for the latter landslides , the influences may be manifested in groundwater congestion , unstable slope form and discrepant sliding mode.

**Key words:** characteristic parameter; formation mechanism; shear test; loess landslide; south Jingyang plateau