

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.04.12

# 基于物理模拟实验的黑方台黄土滑坡破坏机理研究

曹从伍, 许强, 彭大雷, 齐星, 董秀军

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:** 在黑方台地区, 由于长期的灌溉引发了大量的黄土滑坡, 以焦家 4# 滑坡为例, 对该滑坡进行了近景摄影测量分析以及详细的野外调查工作, 对黄土滑坡破坏机理进行研究。结果表明: 黄土滑坡破坏前期后缘开始发育大量裂缝, 破坏后后缘呈圈椅状, 滑动面处于液化化的状态, 滑体软弱松散, 是该区危害最大的一类滑坡。建立物理模型模拟该滑坡的破坏过程, 结果表明: 该滑坡演化过程中, 边坡中后部率先出现裂缝, 逐渐向坡面发展, 裂缝方向顺着斜坡坡面方向, 最后贯穿滑坡体。边坡破坏时, 孔隙水压力激增, 导致黄土液化, 强度降低, 前缘塑性流出, 边坡破坏; 表面位移量达到最大, 表明该滑坡具有明显的突发性特征。

**关键词:** 物理模拟; 黄土滑坡; 变形特征; 破坏机理; 突发性

中图分类号: P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)04-0072-06

## Research on the failure mechanism of the Heifangtai loess landslides based on the physical simulation experiments

CAO Congwu, XU Qiang, PENG Dalei, QI Xing, DONG Xiujun

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** In the Heifangtai area, there are many loess landslides for years of irrigation. The failure mechanism of loess landslides is examined base on the Jiaojia4# landslide. The close-range photogrammetry and detailed field investigation focusing on the deformation and failure of the Jiaojia4# landslide are carried out. The results of the analysis reveal that in the early stage of the loess landslides, many cracks occur in the rear of the landslides. After the loess landslides, the rear becomes a circle chair state, the slide surface is in a liquefaction state and the slide body is loose. Model tests are the most commonly ways to obtain the failure mechanism of landslides. The model test reveals that during the loess landslide, cracks first occur in the middle and rear, and they develop to the hillslope till throughout the slide body. When failure occurs, on the one hand, the pore-water pressure increases sharply, which lead to the liquefaction of loess, causing the reduction of strength and the outflow of the front of the landslide. On the other hand, the displacement of the surface reaches the maximum, indicating that the loess landslides occur with a sudden. The research has a guiding significance to the forecast and prevention of loess landslides.

**Keywords:** physical simulation; loess landslides; deformable features; failure mechanism; sudden

黑方台位于甘肃省永靖县盐锅峡镇东北方向, 地处黄河与湟水河交汇处西南方向, 黄河北岸, 距省会兰

收稿日期: 2015-12-29; 修订日期: 2016-02-15

基金项目: 国家重点基础研究计划(973 计划) 项目资助(2014CB744703); 国家杰出青年科学基金项目资助(41225011)。

第一作者: 曹从伍(1992-), 男, 硕士, 主要从事地质灾害评价与预测研究。E-mail: 930028864@qq.com

通讯作者: 许强(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地质灾害评价预测与防治处理研究。E-mail: xq@cdu.edu.cn

州市约 50 km,属黄河 4 级阶地。自 1968 年开始灌溉农业以来,到目前为止发生了大量的滑坡,形成了特有的黄土滑坡群。黄土滑坡破坏机理的研究对滑坡的预测和防治具有借鉴意义。

已经有许多学者从不同角度对黄土滑坡破坏机理开展了一系列研究。邓龙胜<sup>[1]</sup>将地震作用下滑坡的破坏类型可分为振动软化—剪切破坏、振动液化—流动破坏、振动崩塌破坏及震后蠕变破坏四种。龙建辉<sup>[2]</sup>以直剪蠕变实验为手段,分析了黄土蠕变过程以及伴随着塑性破坏。谷立峰<sup>[3]</sup>通过饱和—非饱和渗流分析,认为地下水位的上升引起黄土孔隙水压力上升及基质吸力下降,强度降低,最终导致黄土斜坡的失稳破坏。胡炜<sup>[4]</sup>对黑方台一滑坡从破坏到运动的全过程进行了模拟,认为焦家崖头滑坡为典型的高速黄土滑坡,具有高位剪出、滑带液化、滑床残留物少等特征。许领<sup>[5]</sup>通过对台塬地表水入渗研究,分析了地表水入渗途径及其与黄土滑坡发育过程的关系。武彩霞<sup>[6]</sup>通过结合遥感影像和现场野外调查,认为黄土泥石流滑坡具有流态化的运移特征,而室内应力路径试验表明,随着水位的上升,孔隙水压力升高,造成底部饱和黄土发生液化,触发滑坡。王家鼎<sup>[7]</sup>通过现场及室内实验提出了高速黄土滑坡机制—黄土蠕动液化。薛强<sup>[8]</sup>基于 DEM 对滑坡变形的分析,提高了计算精度,得到了滑坡壁后移侵蚀速率。

众多学者采用物理模拟实验对滑坡进行过模拟,吴剑<sup>[9]</sup>采用倾斜加载方式获得过滑坡的形态破坏过程。吴昊宇<sup>[10]</sup>利用大型离心机模拟黄土滑坡破坏过程,得到了黄土滑坡的变形破坏特征。朱雷<sup>[11]</sup>运用振动台对岩质滑坡变形破坏过程进行研究。陈伟<sup>[12]</sup>对黄土边坡采用降雨手段进行了物理模拟,认为降雨是诱发黄土滑坡的原因之一。吴志坚<sup>[13]</sup>采用振动台对黄土滑坡进行物理模拟,研究了黄土斜坡在地震作用下的变形特征及失稳破坏过程。

本文根据近期野外调查结果,结合地形监测数据以及高精度近景摄影测量,首先对焦家 4# 滑坡破坏发展演化进行详细深入的分析,然后,通过室内物理模拟试验,对该滑坡变形破坏机理进行研究。采用现场观测与室内实验的结合,通过物理试验对现场现象进行解释,同时对物理模拟过程中得到的数据进行分析,研究得到黄土滑坡的破坏机理。

## 1 研究区域概况

### 1.1 工程地质背景

黑方台自 1968 年灌溉以来,至今累计发生过滑

坡约 100 多次,受黑方台长期灌溉的影响,该区发生的滑坡规模和频率逐年上升。在黑方台 11.5 km<sup>2</sup> 台缘上分布有大大小小的新老滑坡 75 处,相互连接,新老交替,构成黑方台台缘特有的滑坡群带,尤其以焦家滑坡群最有特色,为典型的黄土滑坡,突发性为黄土滑坡的一大特点。黑方台滑坡分布如图 1 所示。

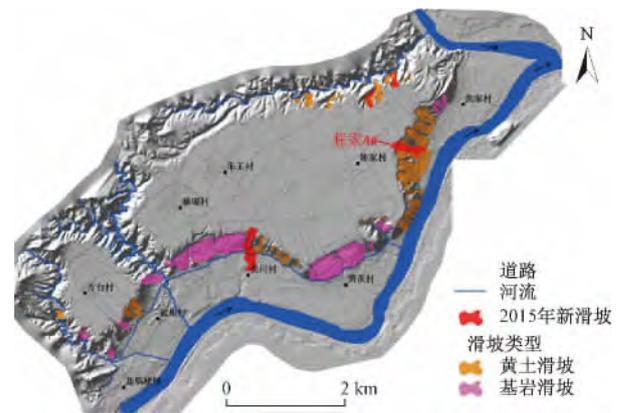


图 1 黑方台滑坡的空间分布及焦家 4# 的位置

Fig. 1 Distribution of the Heifangtai landslides and the location of the Jiaojia 4# landslide

黑方台滑坡以中小型为主,小型滑坡约占 47.37%,中型滑坡约占 44.74%,大型滑坡约占 7.89%。对黑台各水泵站灌溉资料进行整理得到黑方台 2014 年灌溉期情况(图 2),灌溉主要集中在 4 至 11 月,灌溉对滑坡的变化产生了很大的影响。

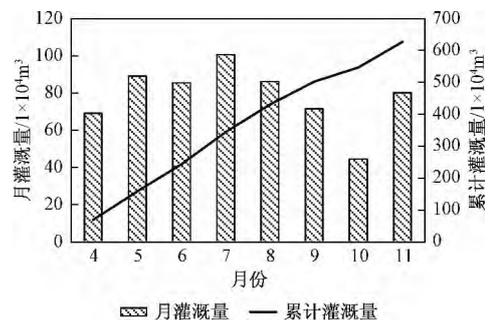


图 2 2014 年灌溉期黑方台灌溉情况

Fig. 2 Irrigation condition in the Heifangtai irrigation period in 2014

根据野外调查及有关地质资料,黑方台地层岩性为:①上更新统风成黄土层(Q<sub>3</sub><sup>col</sup>)约 30 m,呈灰黄色,以粉粒为主,土质均一、疏松多孔;②中更新统冲积层(Q<sub>2</sub><sup>al</sup>)可分为 2 层,上层为粉质黏土层,厚约 6 m,呈褐红色,下层为砂卵石层,厚约 4 m;③下白垩统河口群(K<sub>1</sub>hk)棕褐色和棕红色砂泥岩互层。

### 1.2 焦家 4#滑坡变形破坏分析

焦家 4#滑坡位于焦家滑坡群中部,为该群中最大、典型的黄土滑坡,最新一次滑动发生在 2015 年 1 月 29 日晚 7 点左右,滑坡体约  $1.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,滑动方向  $113^\circ$ ,产状  $165^\circ \angle 13^\circ$ ,焦家 4#滑坡滑动前后地质剖

面图如图 3 所示,滑面发生在黄土内,是典型的黄土内滑坡,滑坡后缘向后移动,整个滑面呈现为弧形。滑动后松散堆积体散落在滑体上,整个斜坡坡度较滑动前减小,随着时间推移,表面松散物运移,滑坡形态又会趋于滑动前形态。

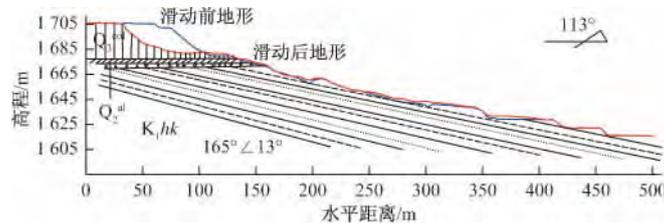


图 3 焦家 4#滑坡滑动前后 I - I' 地质剖面图

Fig. 3 Longitudinal geological profile I - I' from pre-sliding to post-sliding in the Jiaojia 4# landslide

由焦家 4#滑坡地貌(图 4a)并结合滑动前后高程变化量(图 5)分析表明,滑坡后壁出现明显的圈椅状形态,滑坡边界清晰,滑动后的滑体松散,呈粉状,滑坡底部土体呈液化,表明发生了塑性流动。滑体在滑坡中部呈流动状向下移动,在滑坡前缘呈扇状分布。图 4a 中黑色线条区域为该滑坡边界位置,红色区域为本次滑动区域,滑体位于该滑坡中间区域,滑体沿着下面液化的滑动面滑动。

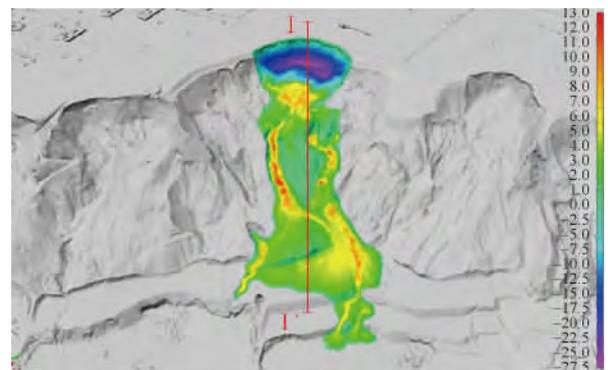


图 5 焦家 4#滑坡滑动前后高程变化量

Fig. 5 Variation of elevation from pre-sliding to post-sliding in the Jiaojia 4# landslide

焦家 4#滑坡发生滑动前,整个滑坡体出现了明显的变形现象,根据野外实地调查资料并结合高精度近景摄影测量图像,得到裂缝的空间分布如图 4b 所示,红色线条为后缘出现的裂缝,可见在该滑体滑动之前其表面发育有大量的裂缝。

灌溉水入渗导致黑方台水位的上升,在地下水作用下,斜坡发展演化直至破坏,地表可以观察到裂缝的出现以及裂缝的发育延伸、局部坡体的垮塌等现象,破坏过程中滑体具有沿着液化的滑面滑动等特点。

由图 4b 可知,裂缝发育方向与滑坡后缘基本平行,裂缝最长为 31 m,主要集中在距边界 6 m 内。裂缝出现是滑坡破坏前的一种表象,并不是滑坡发生的根本原因。通过对滑区内水位(图 4)的测量并结合滑坡滑动面情况,得到滑动面的位置处于水位线以下,相当于滑体沿着液化后的滑面滑动,说明地下水水位的高低是引起滑坡发生的主要原因。

## 2 黄土滑坡物理模拟试验

### 2.1 实验模型及实验概况

采用自主设计的尺寸为  $0.8 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$  滑坡模拟箱,试样为高 500 mm,底部长 482 mm,斜坡坡度为  $70^\circ$ 。模型箱侧壁均为透明玻璃板,有利于观察斜坡破坏过程。

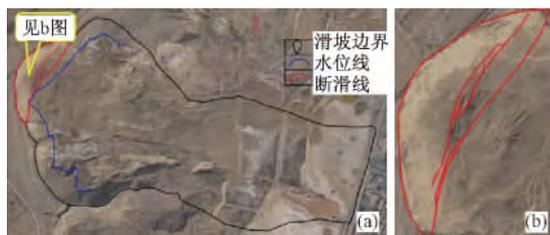


图 4 焦家 4#滑坡地貌 (a) 及裂缝分布 (b)

Fig. 4 Landscape (a) and the crack distribution (b) in the Jiaojia 4# landslide

在试样上部加载  $6 \times 20 \text{ kg}$  铁块(共计 120 kg),施加约 1 200 N 的压力,铁块下加设木板保持整个坡体受力均匀。整个实验过程采用连通器原理,保持水位高度恒定在 250 mm 水位处。

考虑到室内实验的局限性,结合黑方台黄土滑坡

的特征,确定本次实验材料为黑方台取回的重塑黄土和粉质黏土,对比现场实际情况,控制土体重度相似系数为1:1,几何相似系数为100。为了防止实验过程中出现管涌现象,紧密压实模型(图6)两侧的黄土。

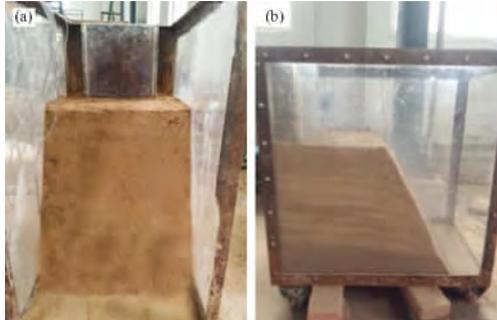


图6 实验模型正面(a)和侧面(b)

Fig. 6 The experimental model viewed from front (a) and flank (b)

实验模型完成后,按照既定实验方案进行,对实验过程进行拍照、录像,做好数据采集。

## 2.2 模型边坡破坏过程

实验过程中模型在不同位置均出现很多裂缝,同时产生不同的变形破坏现象。

实验初始进行时,模型开始浸水,下部土体率先达到饱和,与上部干燥土体形成鲜明的对比。由于土体达到饱和,造成黄土出现了湿陷现象(图7),该湿陷现象直至模型中黄土全部湿润后消失。



图7 黄土湿陷现象

Fig. 7 The phenomenon of loess collapsibility

待水位恒定后,在上覆压力的作用下,裂缝开始发育。裂缝率先出现于边坡两侧,对右侧裂缝进行仔细观察,其发育和形成过程如图8所示。

裂缝随时间不断发展,水位恒定后,最先发育的裂缝处于滑坡的中后部,斜向内侧发展,裂缝宽度较大(图8a)。随着边坡不断变化,该条裂缝逐渐变宽,延伸贯通,同时在边坡体中部出现细小的裂缝(图8b),中部细小裂缝的发育方向为顺着斜坡方向,裂缝长度

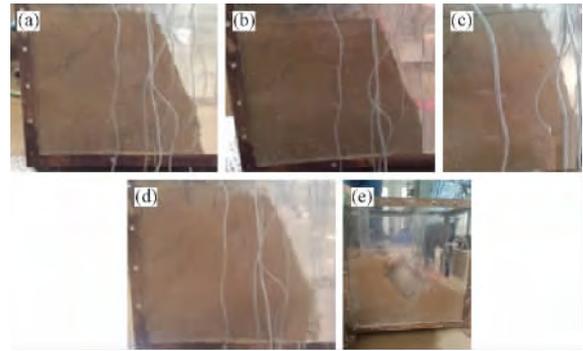


图8 裂缝发育过程

Fig. 8 Process of the cracks development

较短。靠近坡面位置有顺着斜坡方向的裂缝发育,此时中部发育的裂缝变得更宽,延伸也变长,且开始呈现贯穿坡面的趋势(图8c)。大量裂缝发育,沿着滑坡体上部向下发展,裂缝宽度继续增大,主要出现在上部,在滑坡体下部以细小裂缝为主,已贯通了整个坡体(图8d)。

由此可知,在滑坡发育初始阶段,裂缝最先出现于中后部,不断向坡面方向发展。随着边坡的破坏,裂缝发育越来越多,直到裂缝贯穿整个坡体形成软弱滑动面,造成边坡最终的失稳滑动(图8e)。

模型制成施加荷载后,整个边坡形态完整,没有明显的裂缝和局部变形等(图9a)。增加250 mm的水位高度,保持此水位高度12 h,整个滑坡下部含水量增加,中上部由于毛细水的作用,土体变得湿润,从正面观察,整个滑坡没有较明显的变形,侧壁有裂缝发育(图9b)。随着实验的进行,水位线以下部分土体开始有蠕变现象,造成这种现象是因为下部黄土强度降低,在上覆压力作用下,出现塑性流动;同时边坡上部出现明显的张拉裂缝,上部土体下沉约5 cm(图9c)。随着实验的继续,下部土体塑性流出,整个模型体发生滑动,模型边坡向前滑出,后缘出现明显的圈椅状形态,整个滑动面为弧形(图9d)。

由此可知,在地下水作用下土体逐渐达到饱和,上覆压力作用下坡体发生蠕变,造成下部黄土液化,这种变化使黄土发生很明显的形态破坏,最后黄土塑性流出,滑坡发生。边坡破坏前黄土中后部出现明显的张拉裂缝、土体下沉等现象,滑坡发生后后缘呈现为圈椅状形态,滑面为弧形,实验结果与现场现象一致。

## 2.3 破坏机理分析

通过对物理模型边坡的孔隙水压力以及破坏时位移变化的测量,黄土滑坡的破坏具有典型的突发性特征。孔隙水压力变化如图10所示。

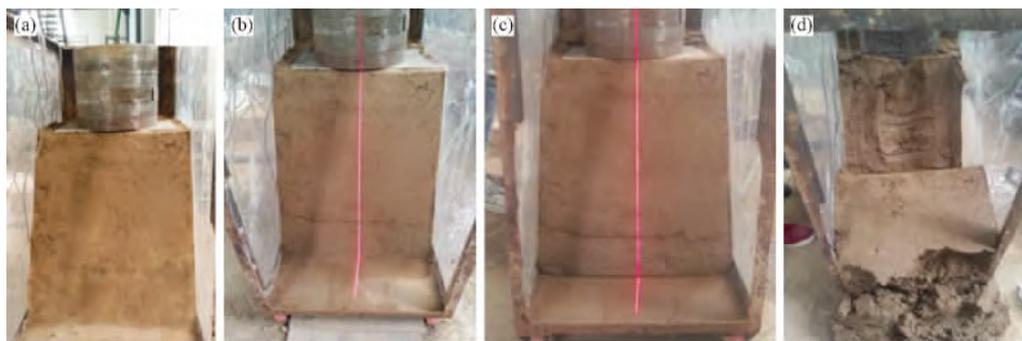


图 9 边坡形态变化

Fig. 9 Change of the slope form in the testing process

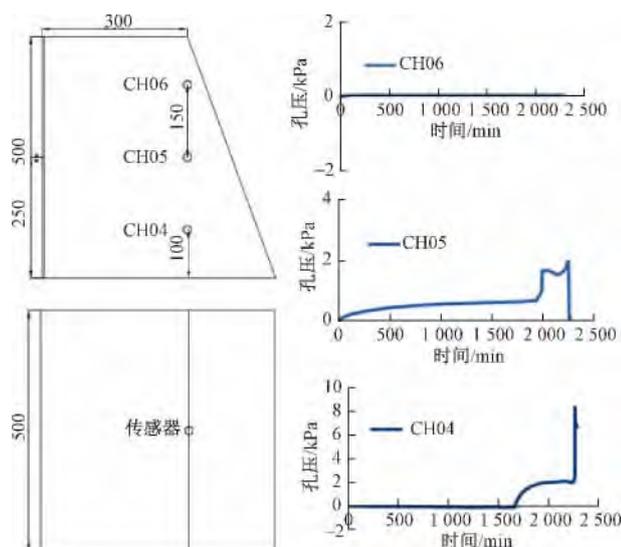


图 10 边坡孔隙水压力变化

Fig. 10 Change in pore-water pressure with time at the monitoring points

模型边坡在开始变形前,空隙水压力开始增加,在破坏即将发生时孔隙水压力激增,达到最大值,随后开始下降。由 CH04、CH05、CH06 对比表明,越靠近滑面位置,孔隙水压力变化越明显,距坡顶越近,孔压几乎不变化。滑坡发生破坏时,滑面附近的孔隙水压力激增,导致黄土液化,土体强度降低,斜坡顺着液化后的软弱面发生滑动,这个破坏过程用时极短,说明黄土滑坡的发生具有明显的突发性和破坏性。

模型边坡在破坏时,通过多点位移计对斜坡位移进行监测(图 11)。边坡变形破坏过程中,随着时间变化表面位移逐渐增大,边坡破坏前,表面位移的增长速度逐渐增大,边坡破坏时,增长速度达到最大,位移增量在极短时间内达到最大值。位移激增与空隙水压力激增呈对应的关系,更加说明了黄土滑坡在破坏过程中具有典型的突发性特征。

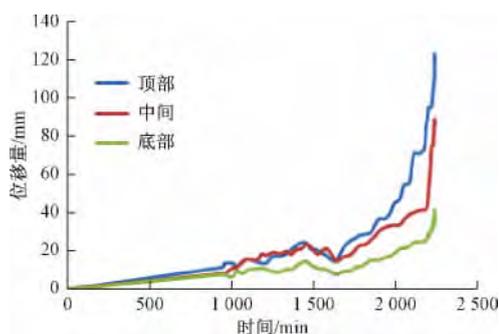


图 11 位移变化曲线

Fig. 11 Change in the displacements with time at the monitoring points

### 3 结论与建议

(1) 黄土滑坡在破坏前期后缘开始有大量裂缝发育,裂缝走向与后缘近似平行,滑动后滑面呈弧形,后缘为圈椅状,滑动面位置处于水位线以下。

(2) 模型滑坡发育过程中,裂缝率先出现在滑坡的中后部,逐渐向坡面发展,裂缝走向以顺着斜坡方向发展为主。在临滑状态,坡体内发育有大量的裂缝,在滑坡后部有明显的拉裂缝。

(3) 黄土滑坡物理模拟中可知,在地下水和上覆压力的作用下黄土发生蠕变,导致液化,黄土强度降低,伴随着后缘出现拉裂缝和上部黄土下沉,下部黄土塑性流出。破坏后的滑坡后缘呈典型的圈椅状形态,滑动面为弧形。

结合黄土滑坡的破坏机理,提出几点建议降低黄土滑坡潜在的风险:(1) 改变大面积的灌溉方式,采用管道喷水的灌溉方式,并做好排水措施;(2) 对滑坡进行长期监测,出现裂缝时,做好预警措施以保护人身财产安全;(3) 在地下水水位下修建排水工程,以达到降低地下水水位的效果。

## 参考文献:

- [1] 邓龙胜, 范文. 宁夏海源8.5级地震诱发黄土滑坡的变形破坏特征及发育机理[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 30 - 37. [DENG L S, FAN W. Deformation breakage characteristics and development mechanism of loess landslide triggered by Haiyuan M8.5 earthquake in Ningxia [J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(3): 30 - 37. (in Chinese)]
- [2] 龙建辉, 郭文斌, 李萍, 等. 黄土滑坡滑带土的蠕变特性[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1023 - 1028. [LONG J H, LUO W B, LI P, et al. Creep property of soil in sliding zone of loess landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 32(7): 1023 - 1028. (in Chinese)]
- [3] 谷天峰, 朱立峰, 胡炜, 等. 灌溉引起地下水位上升对斜坡稳定性的影响 - 以甘肃黑方台为例[J]. 现代地质, 2015, 29(2): 408 - 413. [GU T F, ZHU L F, HU W, et al. Effect on slope stability due to groundwater rising caused by irrigation: a case study of Heifang platform in Gansu, China [J]. Geoscience, 2015, 29(2): 408 - 413. (in Chinese)]
- [4] 胡炜, 张茂省, 朱立峰, 等. 黑方台灌溉渗透型黄土滑坡的运动学模拟研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 183 - 188. [HU W, ZHANG M S, ZHU L F, et al. Kinematic simulation of irrigation-induced loess landslide in Heifangtai [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 183 - 188. (in Chinese)]
- [5] 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): 32 - 35. [XU L, LI H J, WU D X. 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): 32 - 35. (in Chinese)]
- [6] 武彩霞, 许领, 戴福初, 等. 黑方台黄土泥流滑坡及发生机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1767 - 1773. [WU C X, XU L, DAI F C, et al. Topographic features and initiation of earth flows on Heifangtai loess plateau [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1767 - 1773. (in Chinese)]
- [7] 王家鼎. 高速黄土滑坡的一种机理 - 饱和黄土蠕变动液化[J]. 地质论评, 1992, 38(6): 532 - 539. [WANG J D. A mechanism of high-speed loess landslides-saturated loess creeping liquefaction [J]. Geological Review, 1992, 38(6): 532 - 539. (in Chinese)]
- [8] 薛强, 张茂省, 唐亚明, 等. 基于DEM的黑方台焦家滑坡变形分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(1): 133 - 138. [XUE Q, ZHANG M S, TANG Y M, et al. Deformation analysis of the Jiaojia landslide at Heifang platform based on DEM [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(1): 133 - 138. (in Chinese)]
- [9] 吴剑, 张振华, 王幸林. 边坡物理模型倾斜加载方式的研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 713 - 718. [WU J, ZHANG Z H, WANG X L. Study of inclined loading mode on slope in physical model test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 713 - 718. (in Chinese)]
- [10] 吴昊宇, 裴向军, 崔圣华. 灌溉型黄土滑坡变形破坏特征的离心机模型研究[J]. 建筑安全, 2015, (5): 40 - 44. [WU H Y, PEI X J, CUI S H. Research on the centrifugal model of failure mechanism of irrigation loess landslides [J]. Construction Safety, 2015(5): 40 - 44. (in Chinese)]
- [11] 朱雷, 王小群. 大型岩质滑坡地震变形破坏过程物理试验与数值模拟研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 228 - 235. [ZHU L, WANG X Q. Physical modeling and numerical simulation of deformation and failure process of large rockslide in earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(2): 228 - 235. (in Chinese)]
- [12] 陈伟, 骆亚生, 武彩霞. 人工降雨作用下黄土边坡的室内模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(5): 100 - 104. [CHEN W, LUO Y S, WU C X. The laboratory model test study of loess slope under the artificial rainfall [J]. China's Rural Water Conservancy and Hydropower, 2013(5): 100 - 104. (in Chinese)]
- [13] 吴志坚, 雷天, 陈豫津, 等. 黄土斜坡变形失稳破坏特征的振动台模型试验[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(7): 940 - 945. [WU Z J, LEI T, CHEN Y J, et al. Deformation and instability characteristics of loess slope based on shaking table model test [J]. Journal of Shanghai JiaoTong University, 2015, 49(7): 940 - 945. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞