

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2016.04.24

青海东部黄河流域黄土斜坡开挖后变形破坏规律模拟研究

周保^{1,2}, 马涛², 张睿², 张俊才²

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 青海省地质环境监测总站, 青海 西宁 810008)

摘要: 基于青海东部黄土斜坡的开挖情况, 采用 FLAC 软件模拟研究了不同坡度黄土斜坡开挖后的变形破坏规律, 在此基础上确定了斜坡的最优开挖方案。结果表明: 不同角度切坡后, 20° 斜坡仍稳定, 30° 斜坡整体稳定但开挖坡度很陡时前部出现变形, 40° 斜坡整体稳定但中前部出现较大变形甚至破坏, 50° 斜坡整体产生破坏; 不同角度切坡 3 m 高时, 20° 斜坡可开挖至 80°, 30° 斜坡可开挖至 70°, 40° 斜坡不宜开挖, 50° 斜坡不能开挖; 不同角度切坡 6 m 高时, 20° 斜坡可开挖至 80°, 30° 斜坡可开挖至 60°, 40° 斜坡不宜开挖, 50° 斜坡不能开挖。

关键词: 黄土斜坡; 开挖; 变形破坏; FLAC 模拟; 青海东部

中图分类号: P642.13⁺1; TU413.6⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016)04-0147-06

Simulation of the deformation and failure of the excavated loess slopes in the Yellow River basin in eastern Qinghai

ZHOU Bao^{1,2}, MA Tao², ZHANG Rui², ZHANG Juncai²

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054 China;

2. Geological Environmental Monitoring Central Station of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810008 China)

Abstract: Based on the excavation conditions of loess slopes in eastern Qinghai, the deformation and failure of excavated loess slopes with different slope angles were examined with FLAC and the optimal excavation plans of loess slopes were determined, which are very important for reasonable excavation of similar loess slopes in the area. The results show that the slope with an angle of 20° is stable, that of 30° is stable as a whole but deformation occurs in the foreland when excavated seriously, that of 40° is stable as a whole but the lower-middle part produces large deformation, and that of 50° is failure after excavation. The slope with an angle of 20° may be excavated to that of 80°, that of 30° may be excavated to 70°, that of 40° may not be excavated, and that of 50° cannot be excavated when excavated 3 m high at the toe of the slope. The slope with an angle of 20° may be excavated to 80°, that of 30° may be excavated to 60°, that of 40° may not be excavated, and that of 50° cannot be excavated when excavated 6 m high at the toe the of slope.

Keywords: loess slope; excavation; deformation and failure; FLAC simulation; eastern Qinghai

黄土是形成于第四纪的松散堆积物, 主要分布于黄土高原。黄土具有土性疏松、含大孔隙和节理裂隙、

无层理、结构均一、富含碳酸盐、易浸水湿陷等特点^[1], 加之地形复杂, 黄土高原因此成为崩滑灾害的

收稿日期: 2015-10-28; 修订日期: 2015-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(41302253); 青海省应用基础研究(2014-ZJ-706); 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室开放基金(2014G1502027); 大通河流域地质灾害调查(12120113009000)

第一作者: 周保(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事工程地质、地质灾害等研究。Email: zhb820322@163.com

通讯作者: 张俊才(1991-), 男, 硕士, 主要从事工程地质、地质灾害调查与研究。Email: zhangjuncaicug@163.com

高发区之一。促进黄土斜坡失稳的主要因素有自然和人为两类,其中降水和人类工程活动是最积极的诱发因素^[2]。位于黄土高原西部边缘的青海东部地区,是省内人口较为密集、经济较为发达和人类工程活动较为强烈的地区。区内地形复杂,在广大的农村地区长期以来广泛存在切坡取土、建房的现象。村民自行开挖黄土斜坡很容易引发崩塌和滑坡。

针对黄土斜(边)坡的稳定性、变形破坏和最优开挖坡度等问题,许多学者进行了深入研究。张茂省等^[2]认为深入坡脚的开挖斩坡活动严重改变了黄土斜坡原有的应力环境;纪海波^[3]分析了不同坡度黄土边坡的稳定性,提出了边坡的最优开挖坡度;孙伟青^[4]认为坡脚开挖造成边坡应力重分布,使得坡脚和坡顶分别产生剪应力和张应力集中;唐东旗^[5]认为在坡角一定时,坡高控制了坡体的稳定性,坡体的稳定性随放坡角度的增加而逐渐降低;刘悦等^[6]认为黄土路堑边坡开挖后中后部土体以垂直向下变形为主,前部土体以水平变形为主,且前部的变形远大于中后部的变形,其变形破坏的力学机制为蠕滑—压制拉裂;宋飞等^[7]认为黄土边坡开挖时开挖坡角及开挖形式既要满足坡体稳定性的要求,也要满足坡面稳定的要求;颜斌等^[8]认为黄土边坡在强降水条件下水分入渗的深度有限,为表层 2 m 深度范围,且入渗深度随着降水时间的增加而增加,边坡安全系数逐渐减小,但对边坡整体稳定影响不大。上述研究多以陕西、山西等地的黄土边坡为研究对象,由于黄土具有地域差异性,且斜坡稳定性受坡高和开挖规模的影响,上述成果不能直接应用于青海东部黄土地区。因此,有必要基于区内实际,研究黄土斜坡开挖后的变形破坏规律,确定最优开挖方案,为崩滑灾害的防治提供技术支撑。

1 典型黄土斜坡及其数值模型

据调查,青海东部黄河流域典型黄土斜坡的坡高多为 20~30 m,坡体由马兰黄土构成,局部发育节理裂隙,无地下水分布,为黄土崩塌、滑坡的发育提供了条件(图 1)。区内气候干燥,降水较少,且由于降水入渗深度有限,因而本身稳定的黄土斜坡开挖后短期稳定性较好。正因为如此,区内特别是农村地区,将黄土斜坡开挖成近于直立的陡壁的现象较为普遍,从长远角度考虑,这成为潜在崩塌滑坡灾害隐患点。

为了便于研究,根据典型黄土斜坡的坡高,确定模拟斜坡的高度为 25 m,参考区内农村切坡建房(1 或 2



图 1 区内典型黄土斜坡

Fig. 1 Typical loess slopes in the study area

层)的现状,确定不同角度切坡的高度为 3 m 或 6 m (图 2)。同时,为了使研究结果广泛适用,斜坡的原始坡角分别取 20°、30°、40°、50°、60°、70°、80°,开挖后坡角分别取 30°、40°、50°、60°、70°、80°。以 40°斜坡为例,以切坡高度为控制条件,分别切坡形成开挖后坡角为 50°、60°、70°、80°的 4 个边坡,依此类推。

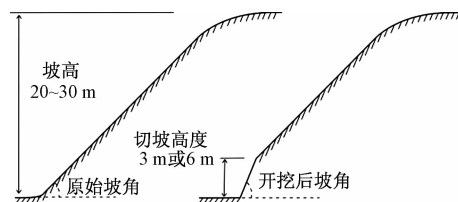


图 2 区内斜坡及切坡示意图

Fig. 2 Sketch map of the slope and excavation in the study area

将斜坡的变形破坏视为平面应变问题,建立数值模型(图 3)。其边界条件为:上边界为自由边界,左、右边界处固定水平位移,底边界为固定位移边界,并固定模型在垂直于纸面方向的位移。计算荷载只考虑重力。将黄土视为理想弹塑性材料,采用摩尔—库伦模型。黄土的物理力学参数根据试验资料取值:天然密度 1390 kg/m³、压缩模量 7.5 MPa、黏聚力 36.4 kPa、内摩擦角 14.3°,泊松比参考同类黄土的资料^[9]取 0.29。

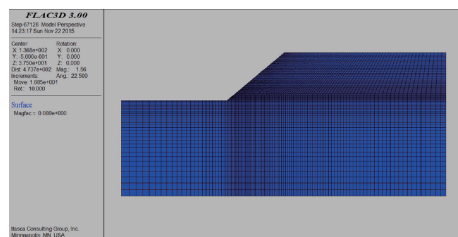


图 3 40°斜坡 FLAC 数值模型

Fig. 3 FLAC numerical model of the slope with an angle of 40°

2 模拟结果分析

2.1 不同坡度黄土斜坡的稳定性及变形破坏

利用强度折减法计算了不同坡度模拟斜坡的稳定系数(图 4)。可见,斜坡稳定性随坡度的增大而非线性减小,斜坡极限整体稳定坡度为 50° ,当坡度大于 50° 时斜坡很容易发生整体破坏,小于 50° 时整体稳定,但不排除局部变形破坏。

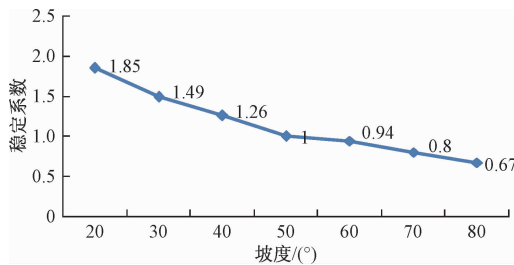


图 4 斜坡稳定性系数随坡度的变化曲线

Fig. 4 Relationship between the safety factor and the slope angle

不同坡度斜坡在重力作用下达到平衡时 X 向位移云图见图 5。可见,坡度 $\leq 30^{\circ}$ 时,坡体的位移分布均匀,斜坡稳定;坡度较大(40° 、 50°)时,坡体中下部出现明显的变形;坡度 $\geq 60^{\circ}$ 时,斜坡发生整体破坏。

综合上述分析,在只考虑重力的情况下,斜坡在坡度小于 30° 时稳定;坡度介于 $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 时,斜坡整体稳定但中下部出现变形甚至破坏;坡度大于 50° 时,斜坡出现整体破坏。

2.2 不同坡度黄土斜坡开挖后的变形破坏

(1)切坡高度为 3 m 时,不同坡度黄土斜坡开挖后的变形破坏(限于篇幅,仅列出 40° 斜坡开挖后图件)

20° 斜坡开挖成 30° 、 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 后,坡体位移分布均匀,坡体稳定;同时,开挖坡度 $\geq 70^{\circ}$ 时,开挖面附近出现小范围的拉张塑性区,即可能出现小规模塌落。

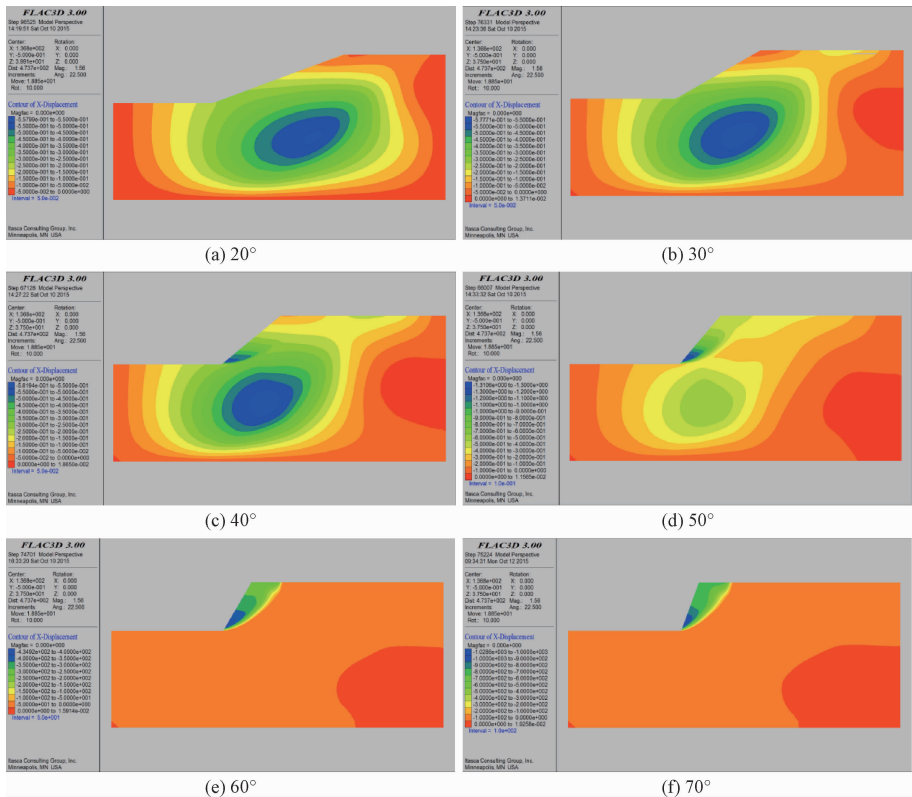


图 5 不同斜坡的 X 向位移云图

Fig. 5 Contour of X-displacement of different slopes

30° 斜坡开挖成 40° 、 50° 、 60° 、 70° 、 80° 后,开挖坡度较小时,坡体位移分布均匀;开挖至 80° 时,开挖面附近出现局部变形。同时,当开挖坡度 $\geq 50^{\circ}$ 时,开挖面附近出现小范围拉张塑性区,即可能出现小规模

塌落。

40° 斜坡开挖成 50° 、 60° 、 70° 、 80° 后,坡体中下部产生变形甚至破坏,随着开挖坡度的增大,潜在变形破坏区的范围越来越大(图 6)。同时,随着开挖坡度的

增大,塑性破坏区的范围逐渐往坡顶方向扩展,当开挖坡度 $\geq 60^\circ$ 时,开挖面附近产生拉张塑性区,即可能出现小规模塌落(图7)。

50°斜坡开挖成60°、70°、80°后,坡体产生整体破坏。同时,坡体中下部多为剪切塑性区,上部多为拉张

塑性区,即坡体中下部剪切和上部拉张作用共同导致了斜坡整体破坏。

(2)切坡高度为6 m时,不同坡度黄土斜坡开挖后的变形破坏(限于篇幅,仅列出40°斜坡开挖后图件)

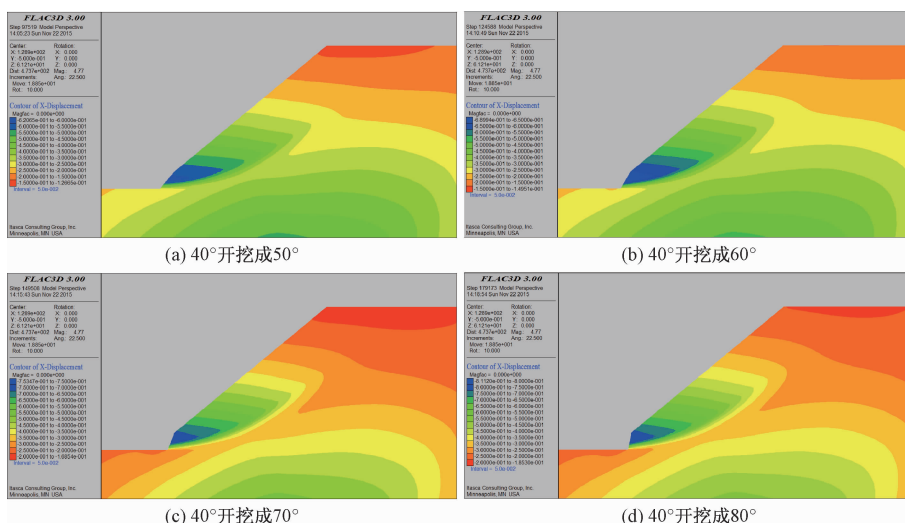


图6 40°斜坡不同角度切坡3 m后的X向位移云图

Fig. 6 Contour of X-displacement of the slope with an angle of 40° after 3 m excavation

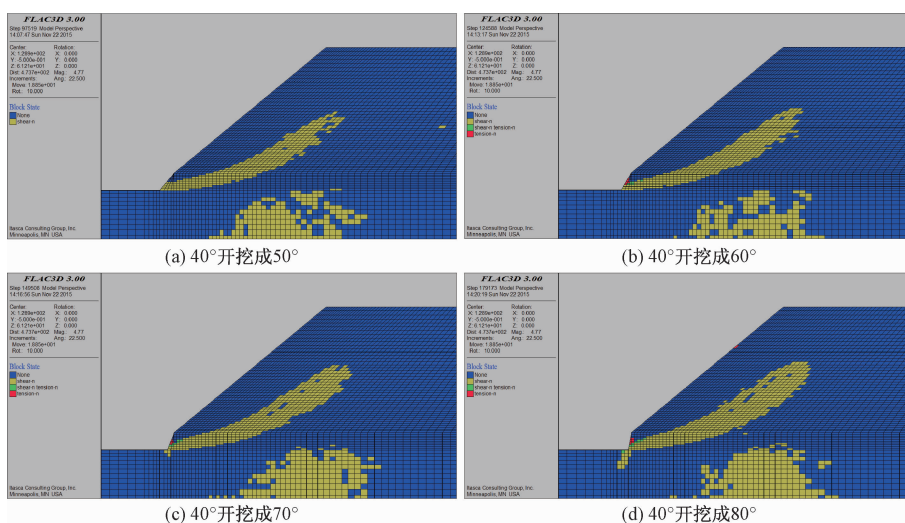


图7 40°斜坡不同角度切坡3 m后的塑性区

Fig. 7 Block state of the slope with an angle of 40° after 3 m excavation

20°斜坡开挖成30°、40°、50°、60°、70°、80°后,坡体位移分布均匀,坡体稳定。同时,开挖坡度 $\geq 60^\circ$ 时,开挖面中下部出现小范围的拉张塑性区,即可能出现小规模塌落。

30°斜坡开挖成40°、50°、60°、70°、80°后,当开挖坡度较小时,坡体稳定;当开挖坡度 $\geq 60^\circ$ 时,开挖面附近出现明显的变形。同时,随着开挖坡度的增大,塑性区逐渐由坡脚向坡顶方向扩展;开挖坡度 $\geq 60^\circ$ 时,开挖面附近出现

小范围的拉张塑性区,即可能出现小规模塌落。

40°斜坡开挖成50°、60°、70°、80°后,坡体中下部出现明显的局部变形区,潜在变形破坏区的范围随开挖坡度的增加而增大(图8)。同时,随着开挖坡度的增大,剪切塑性区的范围逐渐往坡顶方向扩展,即剪切变形在加剧;当开挖坡度 $\geq 60^\circ$ 时,开挖面中上部和坡顶附近产生小范围的拉张塑性区,即开挖面可能出现小规模塌落,坡顶产生拉裂缝(图9)。

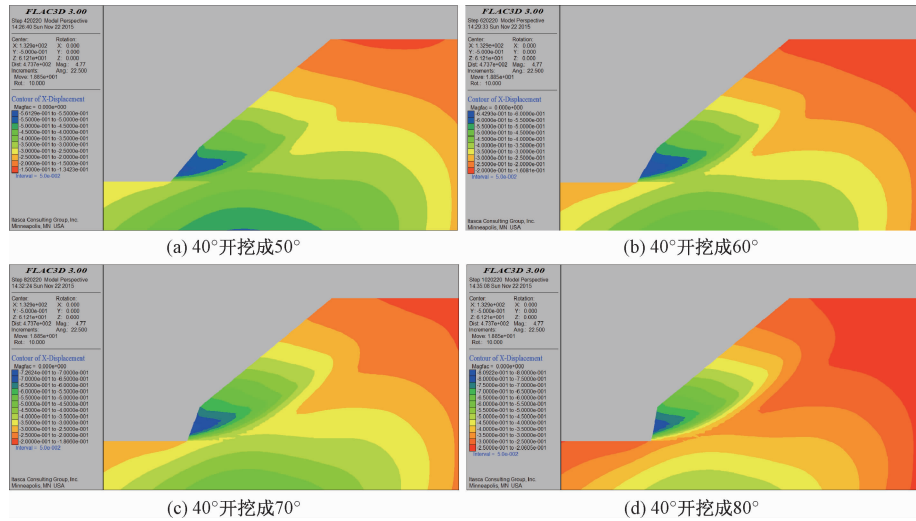


图 8 40°斜坡不同角度切坡 6 m 后的 X 向位移云图

Fig. 8 Contour of X-displacement of the slope with an angle of 40° after 6 m excavation

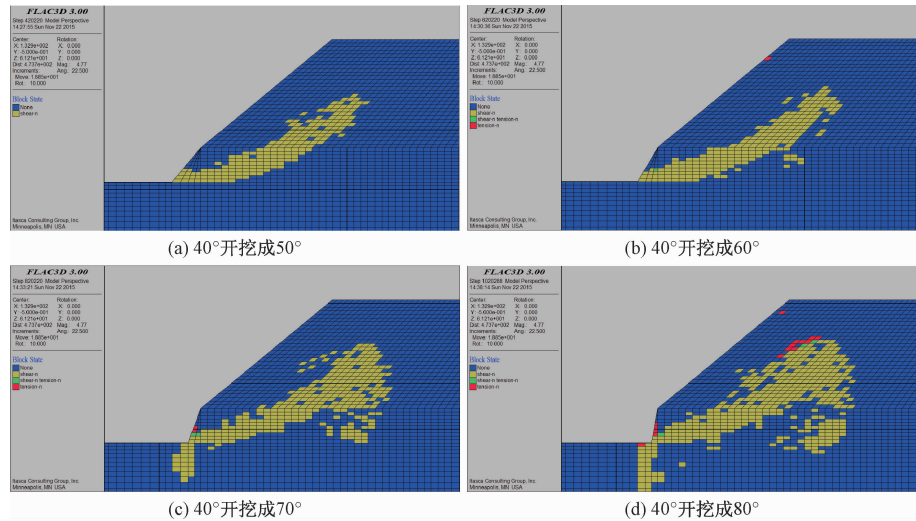


图 9 40°斜坡不同角度切坡 6 m 后的塑性区

Fig. 9 Block state of the slope with an angle of 40° after 6 m excavation

50°斜坡开挖成 60°、70°、80°后,斜坡产生了整体破坏。同时,坡体中下部以剪切塑性区为主,上部以拉张塑性区为主,即斜坡整体发生破坏,坡体中下部剪切、上部拉张作用共同导致了破坏。

3 结论

(1) 根据不同坡度黄土斜坡的位移和稳定性系数的分析,坡度小于 30°时斜坡处于稳定状态,坡度介于 40°~50°时斜坡中下部出现局部变形甚至破坏,坡度大于 50°时出现整体破坏。

(2) 切坡高度为 3 m 时,20°斜坡开挖后处于稳定状态;30°斜坡开挖后整体稳定,但开挖成 80°时斜坡

前部出现变形;40°斜坡开挖后整体稳定,但斜坡中前部出现较大变形甚至破坏;50°斜坡开挖后整体破坏。

(3) 切坡高度为 6 m 时,20°斜坡开挖后处于稳定状态;30°斜坡开挖后整体稳定,但开挖坡度 $\geq 60^\circ$ 时斜坡前部出现变形;40°斜坡开挖后整体稳定,但斜坡中前部甚至整体出现较大变形;50°斜坡开挖后产生整体破坏。

(4) 以坡体是否产生较大变形或破坏为判据,确定黄土斜坡的最优开挖方案为:切坡高度为 3 m 时,20°斜坡可开挖至 80°,30°斜坡可开挖至 70°,40°斜坡不宜开挖,50°斜坡不能开挖;切坡高度为 6 m 时,20°斜坡可开挖至 80°,30°斜坡可开挖至 60°,40°斜坡不

宜开挖,50°斜坡不能开挖。

参考文献:

- [1] 王永炎,林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质[M]. 北京:科学出版社,1990. [WANG Y Y, LIN Z G. Structural characteristics and physical and mechanical properties of loess in China[M]. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)]
- [2] 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报,2011,19(4):530-540. [ZHANG M S, LI T L. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides[J]. Journal of Engineering Geology, 2011,19(4):530-540. (in Chinese)]
- [3] 纪海波. 黄土地区公路边坡稳定性分析—以广浑高速公路上韩村黄土边坡为例[D]. 武汉:武汉科技大学,2011. [JI H B. Stability analysis on the side slope of the highways in loess land—a case study on loess slope in Shanghan village on Guangling-Hunyuan expressway [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)]
- [4] 孙伟青. 开挖卸荷型黄土滑坡力学响应机理研究—以白鹿塬瀛桥滑坡为例[D]. 西安:长安大学,2013. [SUN W Q. Research on mechanical mechanism of excavation and unloading landslide-for the example of the landslide of Baqiao[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)]
- [5] 唐东旗. 坡脚开挖的黄土滑坡机理研究[D]. 西安:长安大学,2013. [TANG D Q. Study on the loess landslide mechanism of slope toe excavation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)]
- [6] 刘悦,黄强兵. 黄土路堑边坡开挖变形机理的离心模型试验研究[J]. 水文地质工程地质,2007,35(3):59-63. [LIU Y, HUANG Q B. Centrifuge model test on the deformation mechanism of loess cut slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007,35(3):59-63. (in Chinese)]
- [7] 宋飞,李亚兰,陈志新. 考虑坡面稳定的黄土高切坡设计研究[J]. 水文地质工程地质,2008,36(2):45-48. [SONG F, LI Y L, CHEN Z X. Design on high cutting loess slope considering slope surface stability [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008,36(2):45-48. (in Chinese)]
- [8] 颜斌,倪万魁,刘海松. 黄土边坡降水入渗规律及其稳定性研究[J]. 水文地质工程地质,2009,37(5):77-81. [YAN B, NI W K, LIU H S. Research on rainfall infiltration law and stability of loess slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009,37(5):77-81. (in Chinese)]
- [9] 谷天峰,王家鼎,任权,等. 循环荷载作用下黄土边坡变形研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增刊):3156-3162. [GU T F, WANG J D, REN Q, et al. Study on deformation of loess slope under cycle load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Sup):3156-3162. (in Chinese)].

责任编辑:汪美华

(上接第146页)

- [13] 林鲁生,冯夏庭,白世伟,等. 人工神经网络在边坡滑移预测中的应用[J]. 岩土力学,2002,23(4):508-510. [LIN L S, FENG X T, BAI S W, et al. Application of artificial neural networks prediction of sliding slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002,23(4):508-510. (in Chinese)]
- [14] 吴钟腾. 云南彝良麻窝滑坡失稳后的运动危险性预测研究[D]. 成都:成都理工大学,2014. [WU Z T. The prediction of the movement risk on Mawo landslide after the destruction in Yiliang county, Yunnan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (in Chinese)]
- [15] 张雨晴. 甘肃黑方台黄土滑坡系统分析[D]. 西安:西北大学,2007. [ZHANG Y Q. Systematic analysis on loess landslides in Heifangtai, Gansu Province, China[D]. Xi'an: Northwestern University, 2007. (in Chinese)]
- [16] 魏文晖,罗丹,张迪. 基于BP神经网络的城市地震次生火灾起火率研究[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(10):99-104. [WEI W H, LUO D, ZHANG D. Frequency of urban post-earthquake fire based on BP Neural Network [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014,36(10):99-104. (in Chinese)]
- [17] 王德明,王莉,张广明. 基于遗传BP神经网络的短期风速预测模型[J]. 浙江大学学报(工学版),2012,46(5):837-341. [WANG D M, WANG L, ZHANG G M. Short-term wind speed forecast model for wind farms based on genetic BP neural network [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(5):837-341. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华