

# 工程开挖尺度对黄土边坡稳定性影响

唐东旗<sup>1,2</sup>, 姚秀芳<sup>1</sup>, 焦玲<sup>1</sup>, 高均昭<sup>1</sup>, 徐进<sup>1</sup>

(1. 许昌学院 土木工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 湖北文理学院 地理科学系, 湖北 襄阳 441053)

**摘要:** 随着黄土高原地区经济的迅速发展, 场地问题已成为制约地方经济发展瓶颈, 削坡造地成为必然, 为此, 引发了大量灾难性黄土滑坡。从坡体开挖造成边坡失稳的极限平衡理论出发, 在不同开挖尺度下, 分别从应力、应变和屈服区的变化特征等方面进行了计算分析。结果显示, 开挖区域形成水平减载作用, 坡顶易出现张拉裂缝, 开挖加速形成上下贯通的屈服面, 最后对不同开挖尺度下的坡体稳定性进行分析。研究结果对黄土地区边坡开挖具有科学指导意义。

**关键词:** 坡体开挖; 黄土滑坡; 受力分析; Flac2D; 变形特征; 受力特征; 边坡稳定性

**中图分类号:** P642.22    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1151-05

## Influence of engineering excavation scale on loess slope stability

TANG Dong qi<sup>1,2</sup>, YAO Xiu fang<sup>1</sup>, JIAO Ling<sup>1</sup>, GAO Jun zhao<sup>1</sup>, XU Jin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China;

2. Department of Geography, Hubei University of Arts and Science, Xiangfan 441053, China)

**Abstract:** With the rapidly economic development in the Loess Plateau, the site has become a bottleneck restricting the development of local economy, which leads to inevitable slope cutting and therefore a large number of catastrophic loess landslides. According to the limit equilibrium theory of slope instability caused by excavation, the variation characteristics of stress, strain, and yield zone were analyzed under different scales. The results showed that the excavation area forms horizontal load decrement, the top of slope is prone to the occurrence of tension crack, and the excavation can accelerate the formation of the yield surface from top to bottom. Finally, the excavation slope stability was analyzed under different scales. The research results are of scientific and guiding significance on the excavation slope in the loess area.

**Key words:** slope excavation; loess landslide; stress analysis; Flac2D; deformation characteristics; stress characteristics; slope stability

随着西部大开发的进一步推进, 黄土高原地区已成为我国重要的能源、化工基地, 狭窄的区域面积极大地制约了地方经济发展空间。过去, 人们通过开挖窑洞居住、生活, 现在以开挖黄土边坡来扩大生产建设场地, 无不显示着人类对黄土边坡的改造作用。这种改造作用诱发坡体失稳造成了大量的地质灾害—黄土滑坡。如 2006 年陕北延安市杨崖滑坡, 涉及 8 户 47 间房屋, 损失严重<sup>[1,2]</sup>; 2009 年 5 月 16 日兰州发生的滑坡, 造成楼房被毁, 7 人死亡<sup>[3]</sup>; 2009 年 10 月 7 日山西柳林县枣林沟滑坡, 造成 6 人死亡; 2010 年 3 月 10 日陕西榆林市子洲县城山体滑坡, 造成 27 人死亡; 2011 年春季延安飞机场后山由于场地开挖引起坡体产生蠕动变形破坏, 使得场地报废; 2011 年 9 月 17 日, 西安市灞桥区席王街道办石家道村白鹿原北坡发生山体滑坡, 造成 32 人死亡。以上这些地质灾害

均是由于大范围的取土、削坡造地所致。城镇建设极大地改变了坡体原有的平衡状态, 潜伏了发生地质灾害的危机。

一些典型开挖所形成的地质灾害发生已逐渐引起广大学者的关注与研究。首先, 从理论上以极限平衡法进行边坡开挖过程中不同区域的受力分析开始<sup>[4,5]</sup>, 继之有以实际工程开挖过程中的变形监测<sup>[6]</sup>, 有以数值计算来反演边坡开挖的过程的研究<sup>[7-11]</sup>, 同时也有采用实验室模型试验来对开挖过程对边坡所产生的影响进行分析<sup>[12,13]</sup>。总的看来, 都是在一次开挖完成后所进行的受力和变形的分析, 而现实工程多是在多次反复开挖后所形成的新边坡, 并且开挖一次开挖进尺和多次开挖的总进尺大小对边坡稳定性影响较少提及, 而开挖进尺是关系到可利用场地区域大小, 因此本研究具有重要实用价值。

收稿日期: 2014-10-07    修回日期: 2015-03-18    网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.1958.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41130753); 湖北省教育厅科学研究计划项目(Q20122510); 许昌市科技局基础与前沿课题(1404010); 许昌学院科研基金项目(2014089)

作者简介: 唐东旗(1974), 男, 河南西华人, 讲师, 博士, 主要从事地质灾害机理与防治研究。E-mail: dqtang456@163.com

# 1 开挖坡体的稳定性力学分析

坡体开挖后,开挖区域成为新的临空区域,临空区域的阻力缺失,形成水平减载,原有的应力平衡被打破,从而使得坡体内部应力进行重新调整。为表示坡体被开挖前后的受力状态变化,绘制了边坡被开挖后的受力分析简图(图 1),左图中  $S_a$  的空白区域为开挖掉的区域,取其中一个条块进行分析,图中为条底可获得的抗剪力,  $S_a c_i l_i + N'_i \tan \varphi_i$ ;  $c_i, \varphi_i, l_i$  分别为条底有效黏聚力、内摩擦角、长度;  $S_m$  为条底发挥的抗剪力;  $U_a$  为孔隙水压力;  $W_i$  为土条重力;  $N'_i$  为条底有效法向力;  $\alpha_i$  为条底倾角;  $P_i, P_{i-1}$  分别为土条的左右条间力。

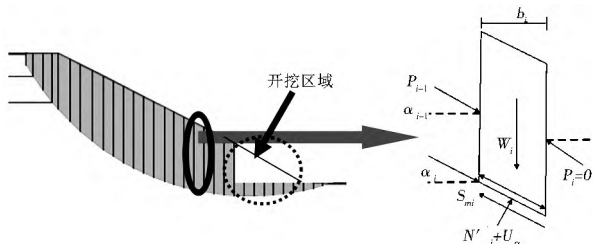


图 1 坡体开挖后的受力分析结构简图

Fig. 1 Stress analysis of the slope excavation structure

按照极限平衡理论对边坡进行切条划分,每一土条所受力如图 1 所示,  $F$  为安全系数。土条的受力分析分别从切线方向和法线方向分析如下:

(1) 土条中底面切线方向的受力平衡方程。

$$S_m + P_i - P_{i-1} \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) - W_i \sin \alpha_i = 0 \quad (1)$$

$$S_m = \frac{S_a}{F} + \frac{C_i}{F} + \frac{N'_i \tan \varphi_i}{F} = C_m + N'_i \tan \varphi_{mi} \quad (2)$$

式中:  $C_i = c_i l_i$ 。将式(2)代入(1)式得

$$N'_i \tan \varphi_{mi} = P_{i-1} \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) - P_i + W_i \sin \alpha_i - C_m \quad (3)$$

(2) 土条底面法线方向的受力平衡方程。

$$N'_i + U_a - W_i \cos \alpha_i - P_{i-1} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) = 0 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得

$$P_i = W_i \sin \alpha_i - (W_i \cos \alpha_i - U_a) \tan \varphi_{mi} - c_m + P_{i-1} \Psi_i \quad (5)$$

其中,  $\Psi_i = \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) - \tan \varphi_{mi} (\alpha_{i-1} - \alpha_i)$  或

$$\Psi_i = \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) - \frac{\tan \varphi_{mi}}{F} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (6)$$

当坡体被开挖时,坡体下方变为临空面,下部土条对上部土条的条件力消失,即:  $P_i = 0$ , 此时,土体的受力平衡被打破,这时式(1)则变为

$$S_m - P_{i-1} \cos(\alpha_i - \alpha_{i-1}) - W_i \sin \alpha_i < 0 \quad (7)$$

这时,开挖区坡体的临空面处于卸载状态,每一土条的下滑力大于其阻滑力,坡体将有向下滑动的趋势,斜坡处于下滑力作用下的蠕动变形阶段。随着变形时间的增加,蠕动变形首先在坡脚变形较大处形成裂隙,随着裂隙继续向上扩展,当支撑力严重负于下滑力时,将会迅速贯通形成滑面。

# 2 开挖坡体的稳定性计算

## 2.1 工程地质概况

为了模拟开挖对坡体稳定性的影响,选取山西中阳某处由开挖引起的黄土滑坡为例(将其恢复原坡形),在该区域进行取土时发生边坡滑坡,滑动时开挖进尺为 10 m 左右时,形

成  $50^\circ$  左右的坡角,并发生失稳滑动。计算几何模型选取剖面底边长度约为 227 m,坡体高差 88 m,水平方向为  $x$  轴,垂直方向为  $y$  轴。在实际的调查中发现,此次坡体失稳范围仅局限在坡体中部处,属于浅层黄土滑坡。地层分布为上部 15 m 的  $Q_3$  马兰黄土,下部为 40 m  $Q_2$  离石黄土,离石黄土中间夹有多层古土壤层,最下部为  $Q_1$  黄土。

## 2.2 计算工况及参数选取

利用 FLAC2D 进行数值分析,模型见图 2。土体本构模型采用摩尔-库伦弹性模型,并且采用强度折减法计算坡体稳定性系数<sup>[14]</sup>。边界条件:底部约束双向位移,两侧边约束水平向位移。坡体的开挖工况见表 1。数值模拟的开挖方式见图 3,每次开挖进尺增加 5 m,进尺依次为:5 m、10 m 和 15 m。每开挖进尺坡脚度数为  $90^\circ, 80^\circ, 70^\circ \dots$ 。计算所采用的参数选取见表 2。

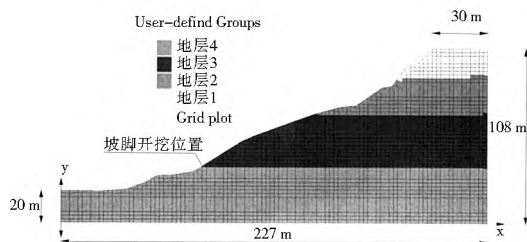


图 2 数值计算模型

Fig. 2 Numerical computation model

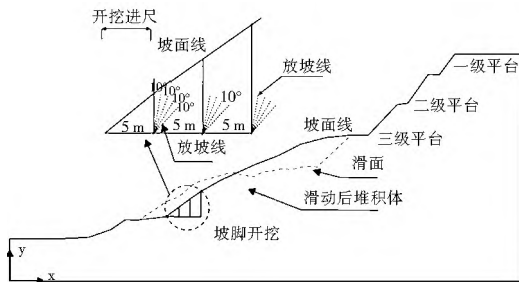


图 3 滑动边坡开挖剖面

Fig. 3 Sliding slope excavation profile

表 1 坡体开挖计算工况

Tab. 1 Working conditions of slope excavation calculation

工况	开挖进尺/m	坡脚开挖成坡坡度( $^\circ$ )						
I	5	90	80	70	60	50	40	30
II	10	90	70	60	50	45	40	35
III	15	90	80	70	60			

表 2 计算选取参数

Tab. 2 Calculation parameters

土层	重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E / \text{MPa}$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
$Q_3$ 马兰黄土	16	9.5	0.35	38.2	19.5
$Q_2$ 离石黄土	17	9.6	0.35	42.5	23.9
古土壤	19	21	0.35	58.5	23

## 2.3 数值计算结果分析

### 2.3.1 坡体变形分析

从未开挖和开挖坡体破坏后竖向与横向位移等值线图来看(图 4、图 5),坡体上部较陡,处于不稳定斜坡阶段,因

此,在坡体未开挖时,随着时间的增长,将最终滑落。坡脚开挖后,由于土体卸荷,会有一些土体产生回弹变形,并且坡脚

土体开挖后使得坡脚水平位移显著增加,这种增加预示着坡脚开挖有产生牵引滑坡的可能性。

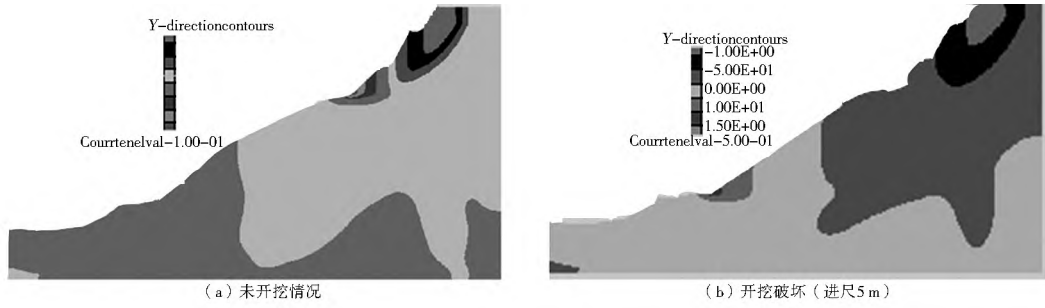


图4 Y方向位移(单位: m)

Fig. 4 Displacement in the Y direction (unit: m)

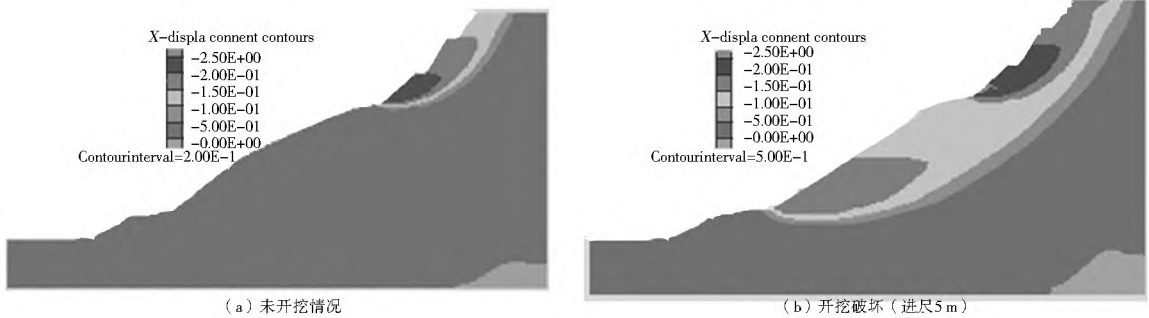


图5 X方向位移(单位: m)

Fig. 5 Displacement in the X direction (unit: m)

对不同开挖进尺工况下坡体变形进行了计算(图6),主要分析了坡脚点最大位移的变化趋势,从图中可以看出:(1)当进尺为5m时,开挖坡度从90°(直立)~50°变化时,坡体被挖掉土体较少,对上部边坡支撑力能够满足稳定状态,当坡度为30°时,造成上部坡体整体坡度增大,突然增大,预示着失稳,使得坡脚变形也就是说:当进尺选择5m时,开挖坡度合理范围在90°~50°;(2)当进尺为10m时,开挖坡度从

90°~55°变化范围不是非常显著,仅仅当坡度小于55°后,坡脚位移显著增加。因此,当进尺为10m时,开挖坡度的合理范围在90°~55°;(3)当开挖进尺为15m时,由于进尺较大,当坡度小于90°,切坡范围已经很大,导致坡体失稳。因此不建议大进尺开挖。

### 2.3.2 主应力分析

图7和图8反映了坡体开挖后大、小主应力等值线的分布关系。从图中可以看到,坡体以压应力为主,在坡体表面附近的主应力为零。由于采用摩尔-库伦模型,在数值计算中采用了“拉伸截断技术”<sup>[15]</sup>即:当土体承受拉应力时,即取土体应力为0。因此,坡体应力为零的位置,在实际工程中,可能出现了张拉裂缝,产生“拉-剪”破坏。从图中可以看出,坡顶接近零值的云图范围比较厚,也就是说坡顶最有可能出现“张拉”裂缝。由于坡体主要是受重力作用,图6中大主应力( $\sigma_1$ )比较平顺,走向基本平行于坡体,开挖前后的对比可以看出开挖对主应力的分布产生了明显变化。

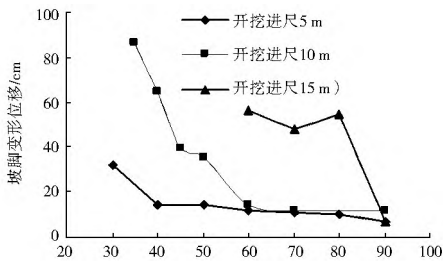


图6 坡脚最大位移和开挖进尺关系图

Fig. 6 Relationship between the max displacement of slope toe and excavation footage

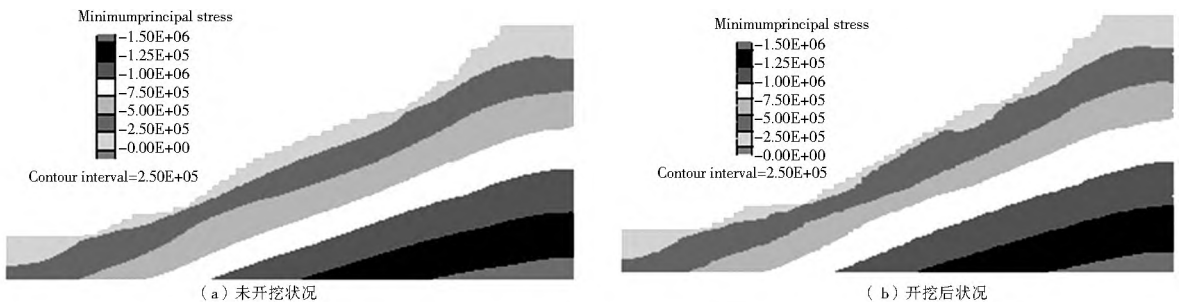


图7 大主应力( $\sigma_1$ )云图(单位: Pa)

Fig. 7 Major principal stress ( $\sigma_1$ ) cloud (unit: Pa)

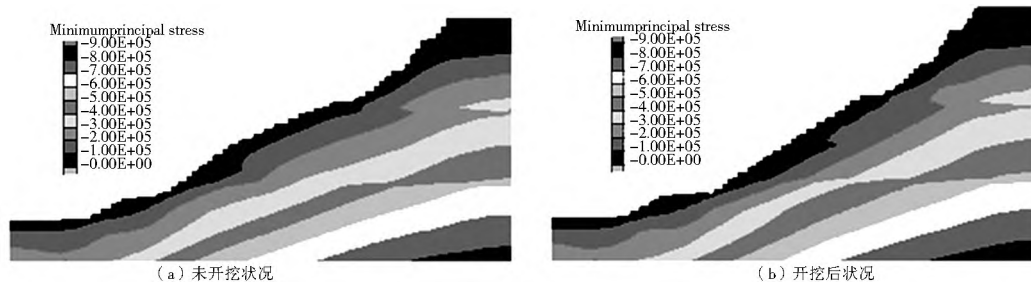


图 8 小主应力( $\sigma_3$ )云图(单位: Pa)

Fig. 8 Minor principal stress ( $\sigma_3$ ) cloud (unit: Pa)

### 2.3.3 屈服区破坏分析

图 9 是坡体各个区域所处的屈服状态,从图中可以看到,未开挖前坡体处于弹性状态。开挖破坏后,坡顶出现拉伸屈服区域,类似圆弧滑带的区域为剪切或者压缩屈服区域,其他区域为弹性区域。图 10 是土体内塑性破坏点的分布图,从图中可以看出,未开挖前,土体如果发生破坏,主要是在坡顶附近和坡脚附近。开挖后,由于对周围土体产生扰动,应力进行重分布,破坏时塑性点的分布基本沿着滑面附近。从图中可以看到开挖坡脚处形成了一条快要贯通至坡顶的潜在滑移面,按照现代土力学理论,塑性应变区贯通时

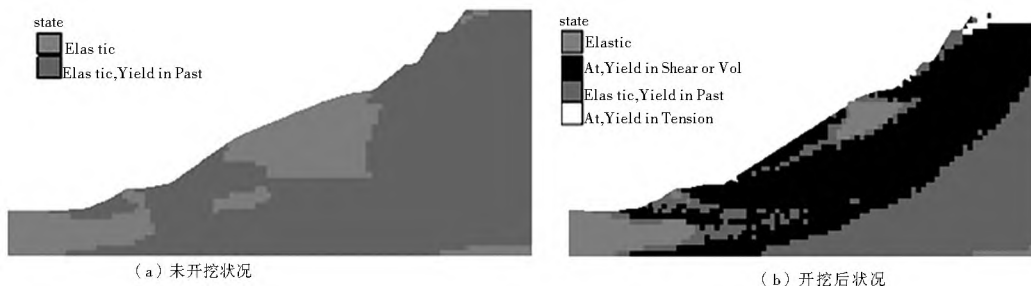


图 9 坡体应力屈服区域分布

Fig. 9 Distribution of slope stress yield area

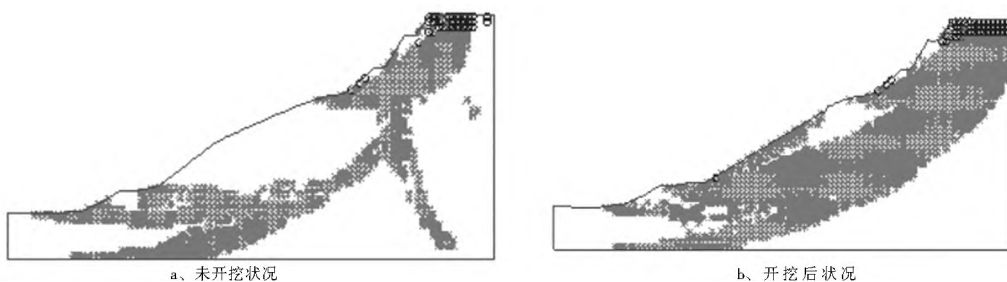


图 10 坡体塑性区分布图

Fig. 10 Distribution of slope plastic area

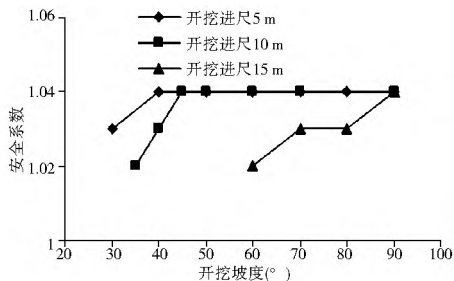


图 11 安全系数和开挖关系

Fig. 11 Relationship between safety factor and excavation

## 3 结论

(1) 坡体被开挖后,开挖面处于卸荷状态,打破了坡体的

可认为是潜在滑移面。

### 2.3.4 稳定性分析

图 11 统计了 0 种开挖进尺(5 m, 10 m 和 15 m)不同开挖坡体坡度时的安全系数。从图中可以看出:(1)当进尺为 5 m 时,坡度从 90°~40°时,坡体安全系数不发生变化,即说明按这种方式开挖,对坡体稳定性影响不明显;当坡度减小至 30°时,安全系数减小到接近极限平衡状态,即说明坡体将要失稳;(2)当进尺为 10 m 时,开挖坡度从 90°~45°时,安全系数连续骤降,预示着坡体即将失稳;(3)当进尺为 15 m 时坡体从一开始开挖安全系数就骤降,说明大进尺的开挖不合适。

稳定状态,加速了坡体的破坏变形。

(2) 从数值计算的结果来看,在同一进尺情况下,开挖坡角越小,对坡体挖方量越多,对坡体整体影响越大,反之,则越小。

(3) 在同一倾角情况下,进尺越大对坡体整体影响越大,反之,则越小。当采用小进尺、大倾角时,对边坡整体稳定性的影响较小,若采取小倾角,势必会影响到其经济效益;采用大进尺时,对坡体改变的影响较大,使得坡体的稳定状况将迅速恶化。

### 参考文献(References):

[1] 王佳运,魏兴丽,薛强. 陕西延安杨崖滑坡的形成机理及其致灾分析[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1230-1234. (WANG Jia yun,

- WEI Xingli, XUE Qiang. Formation mechanism and hazard causes of the Yangya landslide in Yan'an city[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(8): 1230-1234. (in Chinese)
- [2] 殷跃平. 中国典型滑坡[M]. 北京: 中国大地出版社, 2007(YIN Yue ping. landslides in China selected case studies[M]. Beijing: China land press, 2007. (in Chinese))
- [3] 穆鹏, 吴玮江, 杨涛. 2009年兰州市九州石峡口滑坡成因及其西侧高边坡稳定性研究[J]. 西北地震学报, 2010, 32(4): 343-348. (MU Peng, WU Wei jiang, YANG Tao. Study on the forming cause of Shixiakou landslide at Jiuzhou, Lanzhou city, in2009 and stability of its western neighbouring high slope[J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(4): 343-348. (in Chinese))
- [4] 王浩, 廖小平. 边坡开挖卸荷松弛区的力学性质研究[J]. 中国地质灾害与防治学报. 2007, 18(Z1): 5-10(WANG Hao, LIAO Xiaoping. Research on the mechanical character of relaxing zone of slopes due to excavation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(Z1): 5-10. (in Chinese))
- [5] 陈春利. 延安地区人工开挖黄土边坡的变形破坏机理研究[D]. 长安大学硕士学位论文. 2012. (CHEN Churli. Study on the deformation and failure Mechanism of excavated loess slope in Yan'an [D]. Chang'an University master degree. 2012 (in Chinese))
- [6] 龚成明, 程谦恭, 杨林浩, 等. 黄土高边坡开挖过程的变形监测分析[J]. 铁道学报. 2010, 32(5): 119-124. (GONG Cheng ming, CHENG Qian gong, YANG Lin hao, etc.. Case study of deformation behaviour of high loess slope in excavation[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(5): 119-124. (in Chinese))
- [7] 肖世国, 周德培. 开挖边坡松弛区的确定与数值分析方法[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(3): 318-322. (XIAO Shi guo, ZHOU De pei. Determination and numerical analysis method of relaxation region for cutting slope[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, 38(3): 318-322. (in Chinese))
- [8] 阿布·里提甫. 基于FLAC3D的黄土边坡稳定性分析[J]. 中国煤炭地质, 2008, 20(9): 32-35. (AB·Litip. Analysis of loess slope stability based on FLAC3D[J]. Coal geology of China, 2008, 20(9): 32-35. (in Chinese))
- [9] 蒋恒. 黄土边坡开挖模拟及稳定性分析[J]. 四川建筑. 2009, 29(02): 105-106. (JIANG Heng. The loess slope excavation simulation and stability analysis[J]. Sichuan Architecture, 2009, 29(02): 105-106. (in Chinese))
- [10] 周建富, 程谦恭, 朱圻. 黄土高陡边坡开挖及土钉支护数值模拟分析[J]. 路基工程, 2010, (3): 9-12. (ZHOU Jian fu, CHENG Qian gong, ZHU Qi. Analysis on numerical simulation of high steep loess slope excavation and soil nailed support[J]. Subgrade Engineering, 2010, (3): 9-12. (in Chinese))
- [11] 孟庆银. 用有限元方法进行开挖边坡变形和稳定性分析[J]. 南昌航空大学学报: 自然科学版, 2010(2): 77-80. (MENG Qing yin. Analysis of deformation and stability of excavated slope by FEM[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2010(2): 77-80. (in Chinese))
- [12] 李明, 张嘎, 胡耘, 等. 边坡开挖破坏过程的离心模型试验研究[J]. 岩土力学. 201031, (02) 366-370. (LI Ming, ZHANG Ga, HU Yun, et al. Centrifuge model tests on excavation induced failure of slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 201031, (02) 366-370. (in Chinese))
- [13] 龚成明, 程谦恭, 刘争平. 黄土边坡开挖与支护效应的离心模拟试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11). 348-3486. (GONG Cheng ming, CHENG Qian gong, LIU Zheng ping. Centrifuge model tests on excavation and reinforcement effect of loess slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11). 348-3486. (in Chinese))
- [14] 葛阳成. 有限差分-强度折减法在边坡稳定分析中的应用[J]. 北京电力高等专科学校学报: 自然科学版, 2012, 29(1): 277-278. (GE Yang cheng. Finite difference-strength subtraction in the application of the slope stability analysis[J]. Beijing Electric Power College (Natural Sciences), 2012, 29(1): 277-278. (in Chinese))
- [15] 于庆磊, 唐春安, 朱万成, 唐世斌. 基于数字图像的混凝土破坏过程的数值模拟[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 72-78. (YU Qing lei Tang Chuan an, ZHU wan cheng, etc.. Digital image based numerical simulation on failure process of concrete[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(9): 72-78. (in Chinese))

(上接第1127页)

- [10] B Rajkarnikar, H P Neopane, BS Thapa. Development of rotating disc apparatus for test of sediment induced erosion in Francis runner blades[J]. Wear, 2013(306): 119-125.
- [11] Steller J, Krella A, Koronowicz J, et al. Towards quantitative assessment of material resistance to cavitation erosion[J]. Wear, 2005, 258(1/2/3/4): 604-613
- [12] 岳高峰, 李延频, 陈德新. 多泥沙河流水轮机磨蚀改造分析[J]. 水力发电, 2010, 36(5): 56-58. (YUE Gao feng, LI Yan pin, CHEN De xin. Modification of hydraulic turbine under abrasion and erosion on sediment laden river[J]. Water Power, 2010, 36(5): 56-58. (in Chinese))
- [13] 金汉林. 含沙河流中低比速混流式水轮机内部流动数值模拟[D]. 西华大学, 2013. (JIN Han lin. Numerical simulation of internal flow in low specific speed Francis turbine in sand water[D]. Xihua University, 2013. (in Chinese))
- [14] 任岩, 张兰金, 李延频, 等. 水轮机的磨蚀失效特性[J]. 排灌机械工程学报, 2012(2): 188-191. (REN Yan, ZHANG Lan jin, LI Yan pin, et al. Sand abrasion characteristics of materials for hydro turbines[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012(2): 188-191. (in Chinese))
- [15] 卢浩, 周明, 王一鑫, 等. 水轮机导叶磨蚀模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(3): 119-121. (LU Hao, ZHOU Ming, WANG Yi xin, et al. Experiment model research in guide vane erosion of the hydraulic turbine[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(3): 119-121. (in Chinese))
- [16] 楚清河, 任岩. 不同含沙量不同流速下水轮机磨蚀性能研究[J]. 人民黄河, 2011(8): 120-121. (CHU Qing he, REN Yan. Abrasion performance of water turbine under different conditions of sediments[J]. Yellow River, 2011(8): 120-121. (in Chinese))