

# 人工堆载诱发黄土滑坡失稳机制分析

陈春利 李同录 贺凯 王鹏

(长安大学 地质工程系 陕西 西安 710054)

**摘要:**随着黄土地区工程建设快速推进,开挖黄土边坡后的弃土废渣直接堆放在斜坡上,从而成为黄土地区人工诱发滑坡灾害的主要类型,其失稳机制的研究具有重要意义。以延安市某人工堆载边坡为例,通过黄土三轴试验分析了堆载作用下原状黄土的强度变形特性,并运用数值模拟研究了边坡堆载过程中潜在最危险滑面上的应力及强度变化趋势,揭示了堆载诱发黄土边坡变形破坏机理。研究结果表明:边坡堆载改变了坡体的应力分布,致使坡体中、下部土体剪应力逐渐接近其抗剪强度,边坡的稳定性随之降低直至失稳破坏。

**关键词:**黄土边坡;人工堆载;三轴试验;变形机理;数值模拟

文章编号:1003-8035(2014)01-0001-05

中图分类号:P694

文献标识码:A

## 0 引言

我国黄土高原沟壑纵横,可耕平地面积少。随着西部经济建设的全面发展,城镇建设加快,土地资源日趋紧张,人类居住场所呈现出向冲沟及高斜坡地带扩张的趋势。为获取更多建设用地,黄土地区常大规模开挖黄土斜坡,开挖后的大量土方一般择地任意堆放,从而造成原本稳定的自然斜坡荷载增加,坡体的应力环境改变,致使斜坡变形破坏,引发滑坡等地质灾害<sup>[1-6]</sup>。对陕北地区黄土滑坡的调查表明,新近发生的滑坡几乎都与人类工程活动有关,其中在坡脚开挖卸载或在坡顶堆载是诱发滑坡、崩塌的主要形式。目前堆载作用下黄土边坡变形破坏机理的研究较少,国内外学者对黄土滑坡机理的研究基本没有考虑人工堆载因素对黄土边坡变形和破坏的影响,缺少基于力学理论与试验支撑的理论分析<sup>[7]</sup>。因此,在对延安市某边坡详细调查基础上,通过建立地质模型,利用室内试验分别对堆载土方和原状黄土的变形强度参数进行测试,采用有限元方法分析该边坡在不同堆载阶段的应力场,从而分析堆载过程中边坡潜在滑动面的应力、应变和强度的演变过程,对堆载诱发黄土边坡失稳机制进行探讨。

## 1 工程概况

选取延安市吴起县袁和庄边坡为研究对象。该边坡平均坡度37°,整体坡高约22m,纵向长度41m,宽度58m(图1)。边坡为黄土峁顶部修建建筑物,开挖黄土土方堆弃在原黄土斜坡上形成的。该边坡上部为2~8m人工填土,下部依次为原状马兰黄土、离石黄土。

由于人工填方土质疏松,且覆盖于边坡中上部,土方堆载后逐渐出现边坡变形,边坡坡肩处可见长达10m的裂缝,局部出现深达0.5m的塌陷洞,坡体南缘出现落水洞。根据坡顶产生的裂缝、塌陷洞等判断,目前该边坡以局部破坏为主,虽未见贯通性破坏面,但已经处于临滑阶段。一旦边坡发生破坏,将对坡顶的建筑物及人员的生命财产安全造成严重威胁。

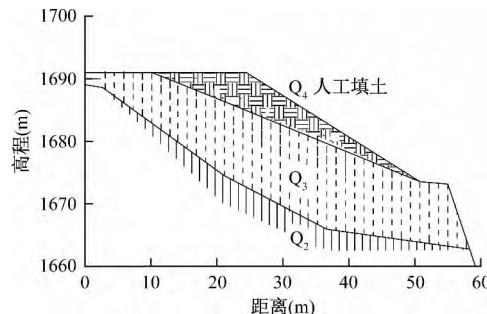


图1 袁和庄边坡工程地质剖面

Fig. 1 Engineering geologic section of Yuanhezhuang slope

## 2 岩土物理力学性质及计算参数

该边坡由人工填土(堆载土方)、Q<sub>3</sub>~Q<sub>2</sub>黄土组成(图1),分别对每层土采取原状土样做常规物理力学性质指标测试(表1)。

收稿日期:2013-03-22; 修订日期:2013-04-16

基金项目:国家自然科学基金项目(40972182); 十二五国家  
科技支撑课题(2012BAK10B01)作者简介:陈春利(1987—),女,博士,主要从事地质工程和地  
质灾害研究。

E-mail: chen\_chunli@126.com

表 1 坡体黄土基本物理力学性质参数  
Table 1 Physical parameters of the loess in the slope

土样	相对密度	天然重度 $\gamma$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	含水率 $\omega$ (%)	孔隙比 $e$	塑限 $\omega_p$ (%)	液限 $\omega_L$ (%)	塑性指数 $I_p$ (%)	强度指标 $c$ ( $\text{kPa}$ )	强度指标 $\varphi$ ( $^\circ$ )
人工填土	2.70	16.2	10.8	0.977	16.5	27.9	11.4	3	26
$Q_3$ 黄土	2.71	15.33	13.9	0.972	22.83	37.04	14.2	36	30.7
$Q_2$ 黄土	2.71	17.51	14.7	0.821	17.7	29	11.3	21	30

通过 SLB-1 型应力-应变控制式三轴仪研究  $Q_3$  黄土的变形与强度特征。边坡堆载土方直接覆盖在  $Q_3$  黄土之上,选取原状  $Q_3$  黄土进行固结不排水剪试验,研究堆载对其强度、变形的影响。试验共设置 12 组围压  $0 \sim 550\text{kPa}$  按  $50\text{kPa}$  递增。将同一含水率不同围压下的试验结果进行整理分析,比较试验曲线和试样的破坏形式,发现黄土在三轴应力环境下呈现劈裂破坏、剪切破坏和鼓胀破坏三种破坏模式(表 2、图 2)。劈裂破坏发生在围压  $0\text{kPa}$  时,相当于后缘拉裂的部位,破裂面和最大主应力一致,应力-应变曲线为典型的应变软化型<sup>[8-9]</sup>,出现峰值以后,有显著的应力降(图 3);剪切破坏

出现在围压  $50 \sim 150\text{kPa}$  时,具有明显的剪裂面,剪裂面和最大主应力斜交,应力-应变曲线呈应变软化型;围压大于  $200\text{kPa}$  之后,试样表现为鼓胀破坏,是典型的塑性变形,圆柱土样中部外鼓,轴向缩短,没有出现明显的剪裂面,应力应变曲线呈现理想塑性和应变硬化型。图 4 为  $Q_3$  黄土试样强度随围压的变化情况。从图 4 中可以看到,当围压不大于  $400\text{kPa}$  时,强度随着围压的增大而增大,但围压大于  $400\text{kPa}$  时,随着围压的增加,试样强度增长变缓。此现象说明,在边坡堆载过程中,少量堆载可使黄土压密,增大土体抗剪强度,而堆载量一旦超过某一值后,随堆载增多黄土强度增长缓慢。

表 2 黄土试样破坏形式  
Table 2 Failure modes of loess sample

围压( $\text{kPa}$ )	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
破坏形式	劈裂破坏	剪切破坏	剪切破坏	剪切破坏	鼓胀破坏							

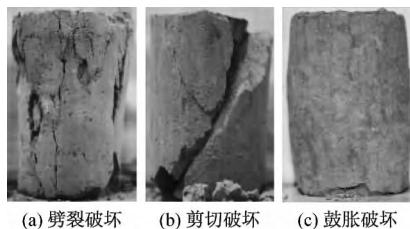


图 2 试样破坏模式

Fig. 2 Failure mode of sample

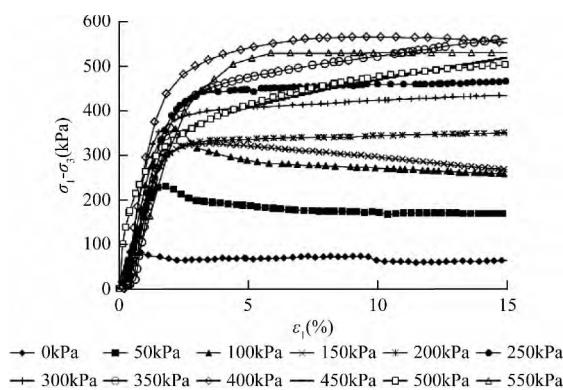


图 3 主应力差与轴向应变关系曲线

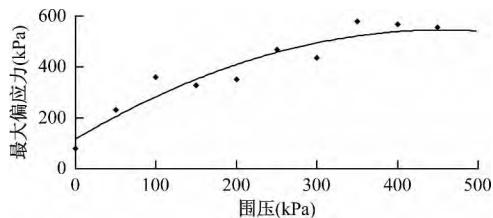
Fig. 3 Consolidated-unloaded triaxial test results of  $Q_3$  loess

图 4 围压对黄土剪切强度的影响

Fig. 4 Inflection of confining pressure to shear strength of loess

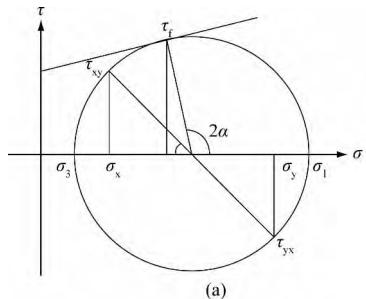
### 3 边坡变形破坏机理的模拟分析

边坡滑移破坏是沿特定的剪切面发生的,因此沿剪切破坏面上的应力和应变是反映边坡变形破坏的主要物理量。根据摩尔-库仑强度理论,剪切破裂面和最大主应力夹角  $\alpha$  为  $45^\circ \pm \varphi/2$ <sup>[10]</sup>,该面在理论上有两个,倾向坡外的一个才是实际中可能的滑移面(图 5)。对于二维平面应变问题,不难得出沿潜在破裂面上正应力和剪应力的大小:

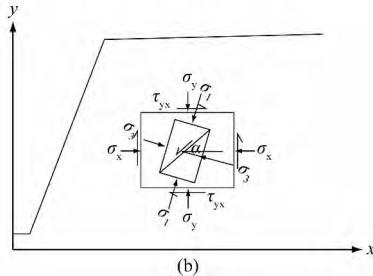
$$\sigma_\alpha = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \sqrt{\frac{(\sigma_y - \sigma_x)^2}{2} + \tau_{xy}^2 \cos(2\alpha)}$$

$$\tau_\alpha = \sqrt{\frac{(\sigma_y - \sigma_x)^2}{2} + \tau_{xy}^2 \sin(2\alpha)}$$

$$\tau_f = c + \sigma_\alpha \tan\varphi$$



(a)



(b)

图5 边坡中土体应力分量和主应力的关系

Fig. 5 Mohr circle showing state of stress at element in slope

由此可见,利用有限单元法求出应力分量  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\tau_{xy}$ ,即可以求得破裂面上的正应力  $\sigma_\alpha$  和剪应力  $\tau_\alpha$ 。如果确定了潜在滑移面,就可以进一步分析潜在滑移面上正应力、剪应力和抗剪力的分布。

根据边坡地质剖面及实测地形,选择潜在主滑方向的典型剖面建立计算模型,计算模型的介质材料划分为人工填土(堆载土方)、 $Q_3$  黄土和  $Q_2$  黄土 3 种基本类型,具体参数取值见表 1。采用 GEO-SLOPE 软件的 SLOPE 模块计算得到该边坡的稳定系数为 1.02,证实该边坡处于临滑状态。同时搜索出最危险滑面(图 6),其坡顶位置与现场发现的坡顶裂缝位置吻合,故认为该滑面即可代表潜在最危险滑面。

依据场地堆载前后的地质地形资料,分别建立边坡堆载前、堆载过程中两个典型阶段及堆载后 4 个有限元计算模型(图 7),有限元剖分网格时,将潜在滑动面作为网格边界或中心,通过平面应变有限元法可求得各单元的应力状态,即  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\tau_{xy}$ 。分别利用 SLOPE 模块和 SIGMA 模块计算边坡不同堆载状态下的稳定性及潜在最危险滑面上的应力变化,并以潜在

滑面长度  $L$  为  $x$  轴,沿滑动面的应力、应变和强度参数为  $y$  轴,绘制滑面上的正应力  $\sigma_\alpha$ 、剪应力  $\tau_\alpha$  和抗剪强度  $\tau_f$  曲线(图 8~图 11)。

1.023

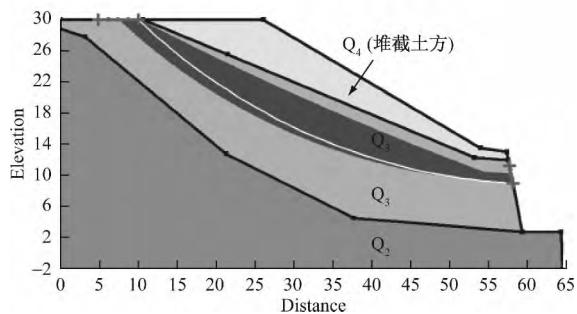


图6 边坡稳定性计算结果

Fig. 6 Computing results of slope

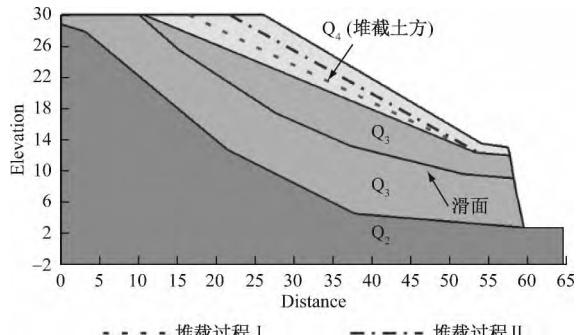


图7 边坡有限元计算模型

Fig. 7 Finite element of slope

由图 8~图 11 可以看出,在各堆载阶段,沿最危险滑面正应力、抗剪强度和剪应力均符合先增后减的规律,在边坡上部不断增长,在边坡中部达到峰值,随后逐渐降低直至坡脚处正应力、剪应力均降至零。

堆载前,潜在最危险滑面上各节点剪应力均小于抗剪强度(图 8),边坡稳定系数为 1.36,边坡处于稳定状态。随着堆载土体的不断增多,由于坡体自重的增加,潜在最危险滑面正应力显著增大,抗剪强度随之增大。同时,堆载改变了坡体土体的应力分布,剪应力有所增长,潜在最危险滑面中部剪应力逐渐接近抗剪强度(图 9、图 10),边坡稳定系数不断减小。堆载后有限元计算结果显示,边坡中下部的剪应力接近甚至超过抗剪强度(图 11),边坡稳定系数 1.02,此时边坡达到临界状态。

模型计算结果还反映出该类滑坡的破坏机制。由于堆载土方上厚下薄,因此堆载过程中滑面中部先

出现剪切力大于抗滑力的情形(图 9),继而破坏区逐渐向下延伸(图 10),直至边坡达到临滑状态(图 11),说明该类滑坡属于推动式滑坡。

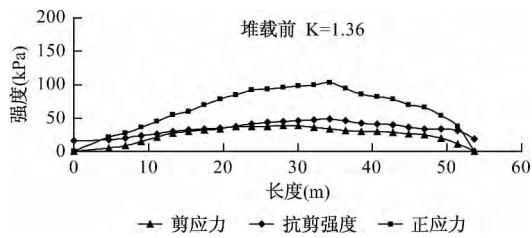


图 8 堆载前最危险滑面上应力分布

Fig. 8 Stress changes on the most dangerous slip surface before loading

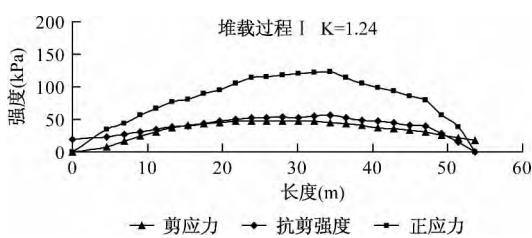


图 9 堆载过程 I 最危险滑面上应力变化

Fig. 9 Stress changes on the most dangerous slip surface of loading process I

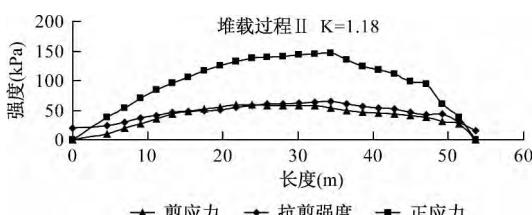


图 10 堆载过程 II 最危险滑面上应力变化

Fig. 10 Stress changes on the most dangerous slip surface of loading process II

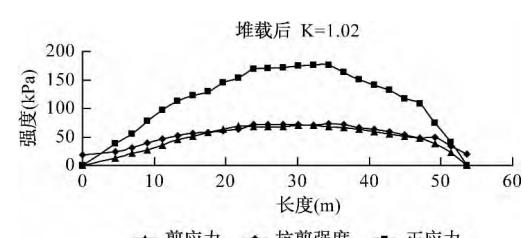


图 11 堆载后最危险滑面上应力变化

Fig. 11 Stress changes on the most dangerous slip surface after loading

值模拟计算的结果表明:

(1) 在边坡堆载过程中,少量堆载可使黄土压密,增大土体抗剪强度,而堆载量一旦超过某一临界值后,随堆载增多黄土强度增长缓慢。

(2) 人工堆载改变了坡体内部的应力分布,导致坡体中下部土体剪应力逐渐接近直至超过抗剪强度,边坡的稳定性随之逐渐降低,最终失稳。

(3) 堆载诱发黄土滑坡的破坏区由上向下逐步贯通,形成推动式滑坡。

由于人工填土土质疏松,雨水入渗会增大坡体自重,不利于边坡稳定,且目前该边坡坡顶已出现拉张裂缝,如不治理会成为雨水灌入通道,因此应加强坡顶、坡体的排水。同时,在坡顶修建构筑物会进一步增大坡体荷载,产生更大的安全隐患,建议在合理选址前提下,对坡体中下部采用格构锚固技术进行治理,防止破坏性灾害发生。

#### 参考文献:

- [1] Derek H. Cornforth. Landslides in practice: investigation, analysis, and remedial/preventative options in soils [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. 2005: 11–34.
- [2] 雷祥义. 陕西关中人为黄土滑坡类型的研究—人类活动的黄土斜坡地质环境负效应问题 [J]. 水文地质工程地质, 1996 (3): 36–39.  
LEI Xiang yi. Research of artificial loess landslides in Guanzhong, Shaanxi—negative problems of loess in geological environment under human activities [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1996 (3): 36–39.
- [3] 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): 86–96.  
ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 86–96.
- [4] 李滨, 殷跃平, 吴树仁, 等. 多级旋转黄土滑坡基本类型及特征分析 [J]. 工程地质学报, 2011, 19(5): 703–711.  
LI Bin, YIN Yueping, WU Shuren, et al. Basic types and characteristics of multiple rotarional landslides in loess [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(5): 703–711.
- [5] 刘朋飞, 李滨, 陈志新, 等. 陕西延安地区黄土滑坡特征及其活跃性分期 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 19(5): 703–711.

## 4 结论与建议

对延安市典型人工堆载边坡进行试验分析及数

- 2012 23(4):16-19.
- LIU Pengfei, LI Bin, CHEN Zhixin, et al. Characteristics and staging of the loess landslide in the Yan'an area, Shaanxi province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and control 2012 23(4):16-19.
- [6] 刘锐, 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, 34(3): 59-62.
- LIU Yue, HUANG Qiangbing. Centrifugemodel test on the deformation mechanism of loes scut slope [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2007, 34(3): 59-62.
- [7] 刘锐, 黄强兵. 模拟堆载作用的黄土边坡土体变形机理试验 [J]. 地球科学与环境学报, 2007(2): 77-81.
- LIU Yue, HUANG Qiangbing. Test study for simulating soil deformation mechanism of loess slope under load condition [J]. Journal of Earth Sciences and Environment 2007(2): 77-81.
- Environment 2007(2): 77-81.
- [8] 刘祖典. 黄土力学与工程 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997: 115-127.
- LIU Zudian. Mechanics of loess and engineering [M]. Shaanxi: Shaanxi Science and Technology Press, 1997: 115-127.
- [9] 王辉, 何青峰, 谢星, 等. 不同地区  $Q_2$  黄土的结构性对比分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4): 99-103.
- WANG Hui, HE Qingfeng, XIE Xing, et al. Comparation for structural behavior of  $Q_2$  loess in different regions [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010 21(4): 99-103.
- [10] Lee W. Abramson, Thomas S. Lee, Sunil Sharma, et al. Slope stability and stabilization methods, 2nd edition [M]. A Wiley-Interscience Publication, 2001: 242-321.

## Mechanism of loess landslide induced by loading

CHEN Chun-li, LI Tong-lu, HE Kai, WANG Peng

(Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In the loess area, spoil of construction excavation are always stacked on slope, which induced many loess landslides, and the loading-induced loess landslide has been a typical human-induced landslide in the Loess Plateau. Hence there are practical significances to study on its mechanism. Focus on a slope under loading condition in Yan'an, strength deformation characteristics of loess were got through the indoor test. Based on geological exploratory profile of the slope, numerical analysis models are established. The stress and strength change on the most dangerous slip surface of slope during loading are studied. The mechanical mechanism of occurrence and development of deformation and failure of loess landslide are revealed. The results show that loading on loess slope changed the stress distribution and the shear stress in middle and lower part of slope gradually came closed to the shear strength during loading, causing the stability of slope reduced until the landslide occurred in the end.

**Key words:** loess slope; loading; triaxial test; deformation mechanism; numerical simulation