

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.02.09

饱和黄土卸载特性影响因素研究

孙书勤¹, 裴向军¹, 袁 广², 张晓超¹, 赵 峥³

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 2. 四川省华地建设工程有限公司, 四川 成都 610081; 3. 成都水文地质工程地质中心, 四川 成都 610081)

摘要: 黄土边坡开挖过程中常遇到边坡发生变形甚至破坏的情况, 不同的开挖速率导致边坡的变形特征也不相同。通过饱和黄土的卸载三轴试验, 研究固结围压及卸载速率对卸载状态下饱和黄土的应力-应变特性、孔隙水压力的发展及应力路径的影响。试验表明, 固结围压越大, 土体破坏所需的偏应力越大, 抗剪强度越大; 卸载速率越大, 对应的偏应力峰值越大, 抗剪强度越大。卸载速率相同时, 土体卸载初期的超静孔压为负值, 增大至正值后孔压的增长速率在其增大过程中逐渐减小; 固结围压越大, 土样剪切过程中对应的孔隙水压力越大。卸载三轴试验中, 土体均表现为应变软化的特性; 饱和黄土破坏时的应变均为1%~3%, 且固结围压越高, 破坏时的应变越小。固结围压相同时, 卸载速率越大, 孔压增长速率越快, 但孔隙水压力值越小。

关键词: 饱和黄土; 卸载三轴试验; 固结围压; 卸载速率

中图分类号: TU411.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0059-05

Influencing factors for unloading characteristics of saturated loess

SUN Shuqin¹, PEI Xiangjun¹, YUAN Guang², ZHANG Xiaochao¹, ZHAO Zheng³

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Sichuan Huadi Building Engineering Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610081, China; 3. Chengdu Center for Hydrogeology and Engineering Geology, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract: The deformation and destruction of loess slopes have become a common phenomenon in the excavation process. Different excavation rates will lead to different slope deformation characteristics. The stress-strain characteristics, the development of pore pressure and the stress path of saturated loess under unloading conditions are studied based on the unloading triaxial tests. The research results indicate that the higher consolidation pressure and the larger unload rate will produce larger deviatoric stress and greater shear strength. When the unloading rate is constant, the value of pore pressure at the initial stage of soil unloading is negative. As it increases to a positive value, the growth rate of the pore pressure begins to decrease during the subsequent growing process. The higher consolidation pressure produces the larger corresponding pore water pressure. In the unloading triaxial test, the loess is characterized by strain softening and the shear failure strain ranges from 1% to 3%. In addition, the higher consolidation pressure may result in the smaller shear failure strain. When the consolidation pressure is constant, the larger unload rates will produce the larger growth rates of pore water pressure and the smaller values of pore water pressure.

Keywords: saturated loess; unloading triaxial tests; consolidation pressure; unloading rate

收稿日期: 2017-10-15; 修订日期: 2017-11-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目资助(2014CB744703)

第一作者: 孙书勤(1961-), 女, 博士, 副教授, 主要从事地质灾害及地质工程研究。E-mail: ssq@cdut.edu.cn

黄土边坡开挖过程中,常发生边坡的变形^[1-5],部分边坡甚至发生滑动破坏。侯晓坤等^[6-7]通过三轴固结不排水试验及相同固结应力下的加载应力路径试验,对开挖应力路径下黄土的变形和强度特性进行研究,结果表明开挖应力路径下饱和土样的应力应变关系为应变软化。王衍汇等^[8]通过工程地质分析法对工程开挖诱发黄土边坡的变形破坏机理进行分析,将开挖黄土边坡的变形破坏过程分为3个阶段:坡脚卸载差异变形阶段、压致拉裂面贯通阶段及“V”型裂缝稳定阶段。邝彬等^[9]通过室内试验对不同应力路径下饱和黄土的应力、应变及孔压特性进行了分析,发现不同固结方式所得到的应力峰值以及稳定的孔隙水压力明显不同。蒋明镜等^[10]通过压汞试验对不同应力路径试验前后黄土孔隙分布的变化进行了研究,发现具有相近孔隙分布的饱和土样在固结不排水试验后其孔隙分布有较大差异,相同条件下减围压三轴试验后孔隙体积大于常规三轴试验。闫澍旺等^[11]通过等向固结的减压三轴伸长试验对饱和黏土卸载特性影响因素进行了研究,发现天津软黏土卸荷过程中呈应变软化,并且剪切破坏时应变为5%~10%。前人对开挖卸载作用下饱和黄土应力-应变关系、孔压变化的研究较多,但对卸载速率相关的研究较少。

本文通过饱和黄土的卸载三轴试验,研究固结围压及卸载速率对卸载状态下饱和黄土的应力-应变特性、孔隙水压力的发展规律以及应力路径的影响。

1 卸载三轴试验

土的室内三轴试验一般包括常规三轴试验(CTC)及卸载三轴试验(RTC)。在边坡开挖卸荷过程中,边坡土体处于卸载状态,此时边坡土体的卸载可以等效为卸载三轴试验(RTC),即轴压 σ_1 不变,减小围压 σ_3 。

1.1 试验土样及试验仪器

试验土样取自甘肃省兰州市,试样为重塑土样,干密度 1.55 g/cm^3 ,含水率10%,比重2.7,液限26.0%,塑限13.9%。对土样进行颗粒分析试验,试验结果如图1所示,主要由颗粒不均匀、良好级配的粉土组成。

试验所用仪器为GDS标准三轴试验系统,包括围压控制器、轴压控制器、反压控制器、压力室等。

1.2 试验方案

试验过程分别考虑了固结围压及卸载速率对黄土卸载特性的影响,试验方案见表1。

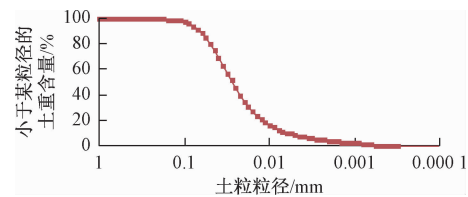


图1 土颗粒级配分布曲线

Fig. 1 Grading of soil

表1 试验方案

Table 1 Test programs

试样编号	固结围压 P_0/kPa	卸载速率/ $(\text{kPa}\cdot\text{min}^{-1})$
1	400	0.5
2	400	1
3	300	2
4	400	2
5	500	2
6	400	10

1.3 试验过程

将土料烘干后制成含水率 $w=10\%$ 、干密度 1.55 g/cm^3 的土样,试样直径50 mm,高度100 mm。制样严格按照相关标准进行,采用标准击实器,将土样分为4层,每击实一层后用刀刮花,防止各层间形成层面。

将制好的试样装入GDS三轴压力室进行饱和,先通二氧化碳饱和150 min,再水头饱和150 min,测得孔压系数 B ,若 $B\geq 0.95$,则试样达到饱和,若 $B<0.95$,则采用反压饱和,直至土样达到饱和,土样饱和后均进行等压固结。

2 固结围压对黄土卸载特性的影响

在相同条件下,卸载速率为 2 kPa/min 时对固结围压 P_0 为300,400,500 kPa的黄土试样进行卸载三轴试验。不同固结围压下的偏应力-应变关系见图2,随着应变的增大,偏应力呈现先增长后下降,而后趋于稳定的趋势,这是由于土体在剪切变形的过程中发生了“应变软化”的特性。3条曲线均对应有偏应力的峰值点,偏应力达到峰值之前,土体基本呈弹性特征,偏应力峰值后土体均为塑性变形,且固结围压越大,偏应力峰值越大,对应土体的抗剪强度越大。

不同固结围压下的孔隙水压力-应变曲线见图3,其中(b)为(a)的局部放大。由曲线可以看出,卸载初期,孔压有小幅减小,导致超静孔压为负值;而后孔压随应变的增大而增大,增长至正值;孔压为正值后,其增长速率逐渐减小,最终达到孔压的最大值。固结围压越大,土样剪切过程中对应的孔隙水压力越大。

图4为不同固结围压下的总应力路径及有效应力

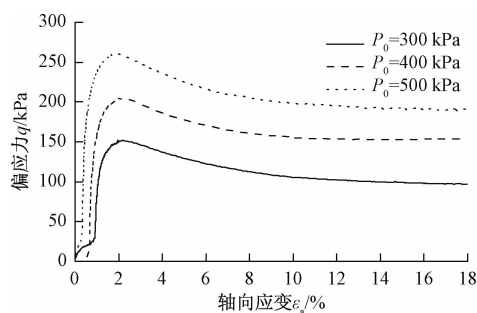


图2 不同固结围压下偏应力-应变关系曲线

Fig. 2 Curves of deviatoric stress-strain under different consolidation pressures

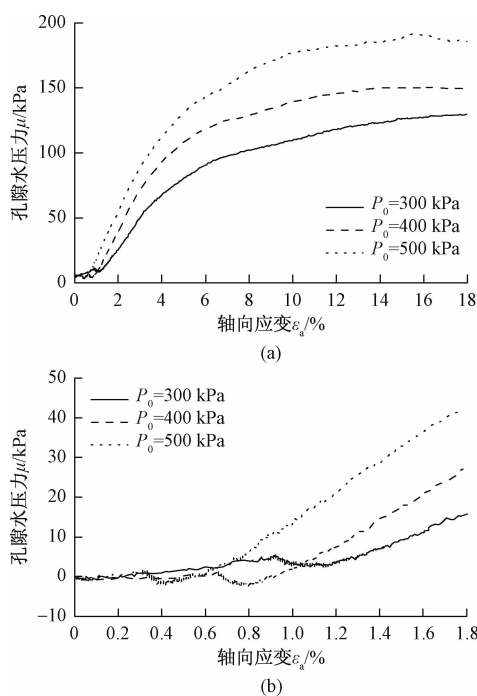


图3 不同固结围压下孔隙水压力-应变关系曲线

Fig. 3 Curves of pore pressure-strain under different consolidation pressures

路径曲线,其中:

$$p' = p - \mu = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (1)$$

$$q' = q = \sigma'_1 - \sigma'_3 \quad (2)$$

式中: p ——平均应力;

q ——偏应力;

μ ——孔隙水压力。

由图4中应力路径曲线可以看出,土体抗剪强度随固结围压的增大显著增大。由总应力路径曲线可以看出,剪应力峰值之前,随着平均应力的增大,偏应力呈线性增长;剪应力峰值之后,土体发生破坏,偏应力迅速降低。卸载过程中,随着偏应力的增大,孔隙水压

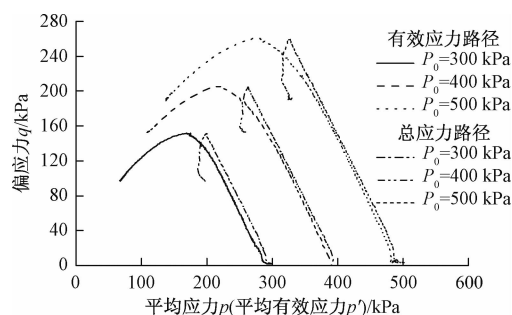


图4 不同固结围压下总应力路径及有效应力路径曲线

Fig. 4 Stress paths and effective stress paths under different consolidation pressures

力也在不断增大,导致有效应力路径曲线相对于总应力路径曲线向左侧发生偏移。

将式(1)代入式(3)可得,偏应力 q 一定时,有效应力路径相对于总应力路径向左侧的偏移量 $\Delta = \mu$ 。

$$\Delta = p - p' \quad (3)$$

式中: Δ ——有效应力路径相对于总应力路径向左侧的偏移量。

土体达到最大偏应力之前,当偏应力相等时,对应的应变 $\varepsilon_a(300 \text{ kPa}) > \varepsilon_a(400 \text{ kPa}) > \varepsilon_a(500 \text{ kPa})$,此时应变对应的孔隙水压力 $\mu(300 \text{ kPa}) > \mu(400 \text{ kPa}) > \mu(500 \text{ kPa})$ 。因此,偏应力相等时,固结围压越小,有效应力相对于总应力路径向左侧的偏移量 Δ 越大。

3 卸载速率对黄土卸载特性的影响

在相同条件下,固结围压 P_0 为 400 kPa 时对卸载速率为 0.5, 1.0, 2.0, 10.0 kPa/min 的黄土试样进行卸载三轴试验。不同卸载速率下偏应力-时间、围压-时间、轴压-时间关系曲线见图5。土体破坏之前,围压以恒定速率减小,偏应力呈线性增长;土体剪切破坏之后发生应变软化,土体继续变形所需偏应力减小,仪器自动对围压 σ_3 与轴压 σ_1 进行调整,因此围压有所增大,轴压发生骤降后稍有增长。

不同卸载速率下的偏应力-应变关系曲线见图6,卸载速率为 0.5, 1.0, 2.0, 10.0 kPa/min 时最大偏应力分别为 193.39, 198.58, 205.98, 216.01 kPa, 因此卸载速率越大,对应的偏应力峰值越大,土体抗剪强度越大。

不同卸载速率下的孔压-时间关系见图7,试验过程中,孔隙水压力均有一个缓慢增长的阶段,且卸载速率越小,该阶段持续时间越久。孔压随时间的推移逐渐增加,且卸载速率越大,孔压增长越快。

孔隙水压力-应变关系曲线见图8。试验初期,卸

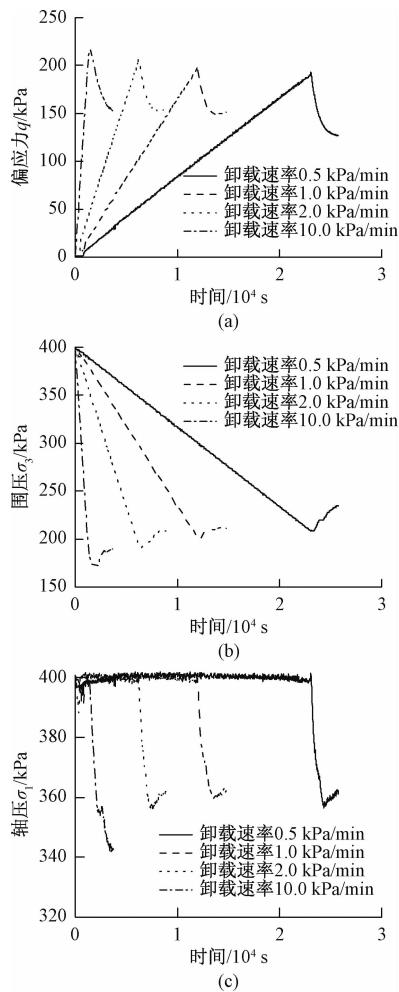


图5 不同卸载速率下偏应力、围压、轴压-时间关系曲线

Fig. 5 Curves among the deviatoric stress, confining pressure and axial pressure with times under different unloading rates

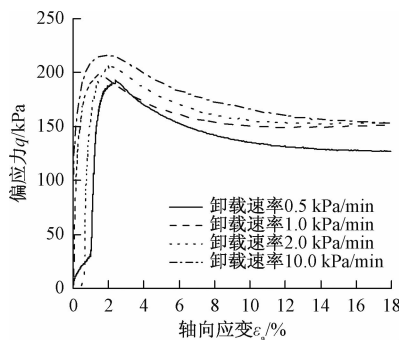


图6 不同卸载速率下偏应力-应变关系曲线

Fig. 6 Curves of deviatoric stress-strain under different unloading rates

载速率 2.0 kPa/min 及 10.0 kPa/min 的孔隙水压力均有小幅减小,后由负转正,逐渐增大。在孔隙水压力上升阶段,卸载速率越小,孔压越大。

图9为不同卸载速率下的总应力路径及有效应力

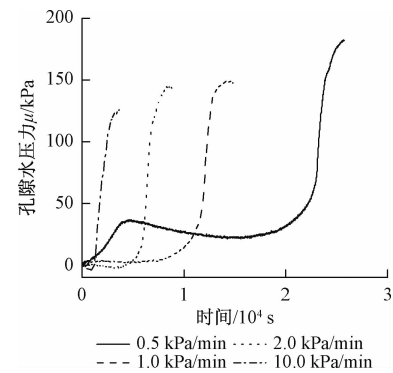


图7 不同卸载速率下孔隙水压力-时间关系曲线

Fig. 7 Curves of pore pressure-times under different unloading rates

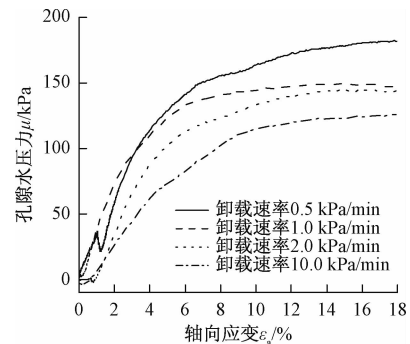


图8 不同卸载速率下孔压-应变关系曲线

Fig. 8 Curves of pore pressure-strain under different unloading rates

路径曲线。固结围压相同时,卸载速率越大,对应的偏应力峰值越大,土体的抗剪强度越大。有效平均应力的变化量随卸载速率的增大而减小,因此卸载速率越小,有效应力相对于总应力路径向左侧的偏移量越大。

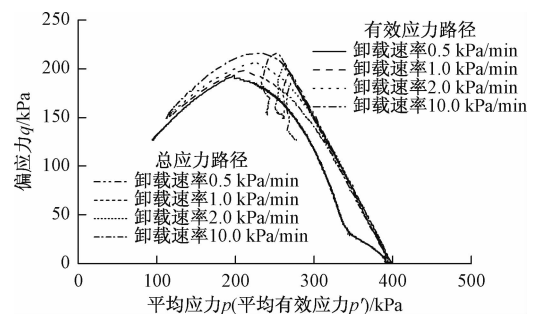


图9 不同卸载速率下总应力路径及有效应力路径曲线

Fig. 9 Stress paths and effective stress paths under different unloading rates

4 结论

(1) 卸载速率相同时,固结围压越大,土体破坏所需的偏应力越大,土体的抗剪强度越大;偏应力相等

时,固结围压越小,有效应力相对于总应力路径向左侧的偏移量越大。

(2)卸载初期,超静孔压为负值,而后孔压随应变的增大而增大至正值后,孔压增长速率在其增大的过程中逐渐减小;固结围压越大,土样剪切过程中对应的孔隙水压力越大。

(3)卸载三轴试验中,土体均表现为应变软化的特性;饱和黄土试样破坏时的应变均为1%~3%,且固结围压越高,破坏时的应变越小。

(4)固结围压相同时,卸载速率越大,对应的偏应力峰值越大,土体的抗剪强度越大;卸载速率越小,有效应力相对于总应力路径向左侧的偏移量越大;卸载速率越大,孔压增长越快,但孔隙水压力值相对越小。

参考文献:

- [1] 唐东旗,姚秀芳,焦玲,等. 工程开挖尺度对黄土边坡稳定性影响[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(6): 1151-1155. [TANG D Q, YAO X F, JIAO L, *et al.* Influence of engineering excavation scale on loess slope stability [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(6): 1151-1155. (in Chinese)]
- [2] 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): 3481-3486. [GONG C M, CHENG Q G, LIU Z P. Centrifuge model tests on excavation and reinforcement effect of loess slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3481-3486. (in Chinese)]
- [3] 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 C M, CHENG Q G, YANG L H, *et al.* 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)]
- [4] 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, 34(3): 59-62. [LIU Y, HUANG Q B. Centrifuge model test on the deformation mechanism of loess cut slope [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(3): 59-62. (in Chinese)]
- [5] 贾杰,裴向军,谢睿,等. 延安市阳崖黄土边坡开挖破坏离心模拟试验研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(1): 1-9. [JIA J, PEI X J, XIE R, *et al.* Centrifugal simulation experiment for a loess cutting-slope at Yangya, Yan'an City, NW China [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(1): 1-9. (in Chinese)]
- [6] 侯晓坤,李同录,李华,等. 高边坡开挖应力路径下黄土变形和强度特性的试验研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(6): 1214-1221. [HOU X K, LI T L, LI H, *et al.* Experimental study of deformation and strength properties of loess under the excavation stress pass of high slopes [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(6): 1214-1221. (in Chinese)]
- [7] 侯晓坤,李同录,李萍. 开挖黄土高边坡的应力路径及变形破坏机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊2): 548-555. [HOU X K, LI T L, LI P. Analysis of stress path and deformation-failure mechanism of high cutting loess slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Sup 2): 548-555. (in Chinese)]
- [8] 王衍汇,倪万魁,李征征,等. 工程开挖引起的黄土边坡变形破坏机理分析[J]. 西北地质, 2015, 48(4): 210-217. [WANG Y H, NI W K, LI Z Z, *et al.* Study on the deformation and failure mechanism of loess slope caused by engineering excavation [J]. Northwestern Geology, 2015, 48(4): 210-217. (in Chinese)]
- [9] 邹彬,王番,胡梦玲,等. 不同应力路径下饱和黄土应力应变及孔压特性分析[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(22): 244-248. [ZHI B, WANG P, HU M L, *et al.* The influence of different stress path on stress and strain relation and pore pressure characteristic of saturated loess [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(22): 244-248. (in Chinese)]
- [10] 蒋明镜,胡海军,彭建兵,等. 应力路径试验前后黄土孔隙变化及与力学特性的联系[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(8): 1369-1378. [JIANG M J, HU H J, PENG J B, *et al.* Pore changes of loess before and after stress path tests and their links with mechanical behaviors [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(8): 1369-1378. (in Chinese)]
- [11] 闫澍旺,张京京,陶琳,等. 等向固结饱和黏土卸载特性影响因素研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊2): 42-47. [YAN S W, ZHANG J J, TAO L, *et al.* Influencing factors for unloading characteristics in saturated clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Sup 2): 42-47.]

责任编辑:张明霞