

DOI: 10.11779/CJGE2021S1021

原状黄土非线性强度特性试验研究

韩波, 李杭州*, 宋丽
(西安交通大学土木工程系, 陕西 西安 710049)

摘要:进行了正常固结和超固结黄土的固结不排水三轴试验,根据试验结果,分析了黄土的非线性强度变形特性,研究了不同固结状态下黄土的应力应变关系、孔压应变关系、有效应力路径。根据应力-应变关系曲线,计算了黄土模量变化规律,结果表明黄土模量不仅随应变变化,而且与围压有关。考虑强度的渐进演变过程,计算了黄土的发挥黏聚力和发挥内摩擦角,分析了发挥黏聚力和内摩擦角随应变的变化规律,进而解释黄土强度的演变过程,以期研究成果对黄土工程建设有一定的指导意义。

关键词:强度特性;割线模量;强度参数;应力-应变关系

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S1-0117-05

作者简介:韩波(1968—),女,博士,主要从事岩土工程材料强度特性等方面的研究工作。E-mail: han_bo961@163.com。

Experimental study on nonlinear strength characteristics of intact loess

HAN Bo, LI Hang-zhou, SONG Li

(Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The loess has strongly nonlinear strength characteristics. It has different strength characteristics under different stress histories. The nonlinear strength and deformation characteristics are analyzed according to the test results. The strain-controlled undrained consolidation triaxial test is performed for the normally consolidated and over-consolidated loess. The stress-strain relationship, pore pressure-strain relationship and effective stress paths of loess are investigated based on the test results. By analyzing the experimental relationship curves of stress-strain, the secant modulus of loess is calculated. The results show that the secant modulus changes with strain and depends on confining pressure. On the other hand, the mobilized cohesion and mobilized internal friction angle are calculated. It is also shown that the cohesion and the internal friction angle change with strain. The mobilization degree of strength parameters of loess is obtained under various stress states. The evolution of strength is analyzed. It is expected to have a reference for the construction of actual projects.

Key words: strength characteristics; secant modulus; strength parameter; stress-strain relationship

0 引言

中国西北地区黄土覆盖广泛,由于其特定的沉积环境和气候条件,形成独特的结构,尤其是土的强度特性呈现出显著的差异,一直都是研究土体力学特性的重要部分^[1]。目前,针对黄土强度特性国内外学者的研究多数是从不同应力路径条件考虑加载、卸载、不同加载速率、压实系数和含水率等对黄土强度和变形特性的影响进行研究^[2-9],较少研究黄土固结状态对其强度特性的影响,张文毅等^[10]通过直剪固结快剪试验分析了重塑正常固结土样在不同含水率和干密度下的强度特性,并通过卸载、直剪快剪试验探讨了含水率与超固结比对超固结土强度的影响。姚爱敏等^[11]介绍和比较了正常固结土和超固结土的排水强度、变形、孔隙水压力和静止侧压力系数等主要力学性质存在的差异。然而,黄土的形成是地壳原岩经受各种风化作用,

经剥蚀、搬运、堆积而形成的一种松散颗粒的集合体,土层固结状态是重要的因素,不同固结状态的土,具有不同的力学特性。因此,本文考虑固结状态针对黄土进行正常固结和超固结三轴试验,依据三轴试验结果对黄土的非线性强度变形特性进行分析,研究黄土的非线性强度特征以及强度渐进演变特性。

1 试验方案

1.1 试验黄土物理参数

试验所用土样取自西安交通大学兴庆校区工程基坑施工现场,采用钻孔法获得原状土样。根据工程地

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2020JM-009,2020SF-394,2019SF-231,2021SF-517);中央高校基本科研业务费专项(300102219520)

收稿日期:2020-12-15

*通信作者(E-mail: lihangzhou77@163.com)

质勘探资料,可知所取试样属于地表下 5~6 m 的 Q3 黄土。该黄土干密度为 1.498 g/cm³,塑限和液限分别为 18.6% 和 33.5%,塑性指数为 14.9,主要物理参数见表 1,其颗粒大小分布曲线见图 1。

表 1 黄土物理性质指标

Table 1 Physical property indexes of loess				
相对密度	含水率	湿密度	液限	塑限
G_s	$w_0/\%$	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$/\%$	$/\%$
2.71	16.8	1.75	33.5	18.6

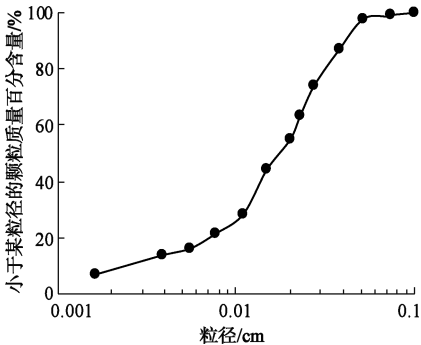


图 1 黄土粒径分布曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of loess

1.2 试验方法

试样制备制成直径 39.1 mm,高度 80.0 mm 的圆柱状土样,放入饱和器中进行真空抽气饱和。

为了研究不同固结状态对土的应力-应变关系的影响,试验时对试样进行排水固结,固结完成后保持围压不变进行固结不排水三轴剪切试验(CU),试验过程中围压为 100,150,200,250 kPa;为制备超固结试样,先将试样在围压 400 kPa 下固结 24 h,然后围压分别降低到 100,150,200,250 kpa,超固结比 $K_c=4,2.67,2,1.6$ 。剪切速率为 0.4 mm/min,直至试样发生剪切破坏或轴向应变达到 15% 即终止试验。

2 非线性强度特性分析

本文分别对正常固结和超固结黄土从应力-应变关系、孔隙水压力与轴向应变关系、强度特性及强度参数 3 个方面对试验的结果进行讨论分析。

2.1 黄土的应力-应变关系变化规律

黄土在正常固结和超固结条件下的偏应力-轴向应变关系曲线如图 2,3 所示,偏应力 $q=(\sigma_1-\sigma_3)$,轴向应变为 ε_a 。由于黄土由松散的固体颗粒组成,其变形主要是颗粒间的位置变化所致。在轴向应力作用下由相同应变增量而引起的应力增量不同,亦即表现出非线性,开始阶段,应力较小,试件变形以弹性变形为主,所以应力-应变关系曲线表现的线性比较明显;随着应力增大,试件变形以塑性变形为主,应力-应变关系非线性明显。

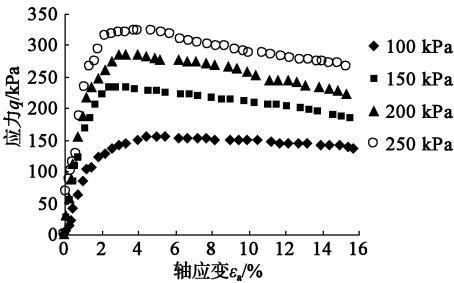


图 2 正常固结 CU 试验应力-应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves for normal consolidation of CU

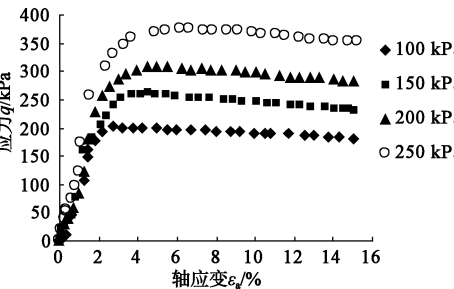


图 3 超固结 CU 试验应力-应变关系曲线

Fig. 3 Stress-strain curves for over-consolidation of CU

试验结果还表明,正常固结和超固结土的应力-应变曲线都具有应变软化趋势。图 2 正常固结土应变软化趋势更明显,初始阶段应力-应变关系曲线较陡。随着轴向应变的增加,偏应力 q 逐渐减小,应力-应变关系曲线趋于光滑,属于应变软化型。

2.2 孔隙水压力与轴向应变关系

对于正常固结土和超固结土的 CU 试验孔压-轴向应变关系曲线如图 4,5 所示。结果表明,孔隙水压力的增长有 3 个阶段。孔隙压力先缓慢增大,然后迅速增大,最后随着剪切变形的增大,孔隙压力逐渐增大并趋于稳定。

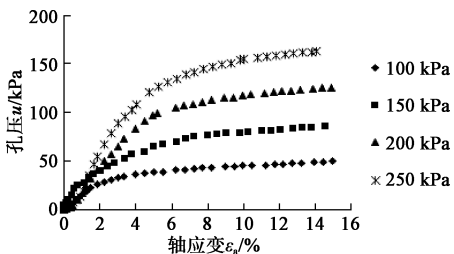


图 4 正常固结土 CU 试验孔压-轴向应变关系曲线

Fig. 4 Pore pressure-strain curves for normal consolidation of CU

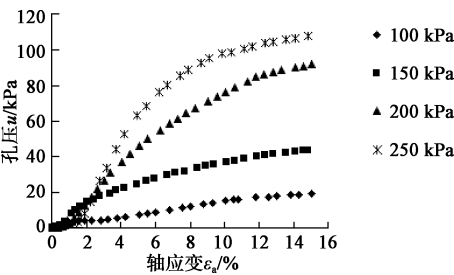


图 5 超固结土 CU 试验孔压-轴向应变关系曲线

Fig. 5 Pore pressure-strain curves for over-consolidation of CU

2.3 强度特性及有效应力路径

正常固结土和超固结土的峰值强度-围压曲线如图 6 所示。正常固结土和超固结土的残余强度-围压曲线如图 7 所示。结果表明:正常固结土和超固结土的峰值强度和残余强度均随围压的增大而增大。在相同围压条件下,超固结试样的峰值强度和残余强度较大。由于剪切过程中孔隙水压力增长缓慢,孔隙水压力较小。其结果是有效应力下降缓慢,因此试样的峰值强度和残余强度较大。图 8 为正常固结土和超固结土的残余强度比-围压关系曲线,可以看出超固结土残余强度比随着围压的增大而增大,而正常固结土残余强度比随着围压的增大而变化不大,几乎是一条水平直线。

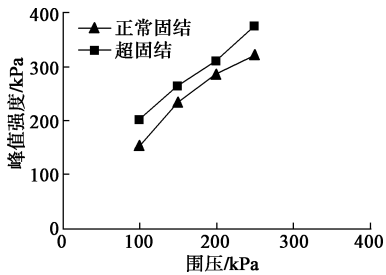


图 6 强度峰值与围压的关系曲线

Fig. 6 Relationship between peak strength and confining pressure for normally and over-consolidated soil

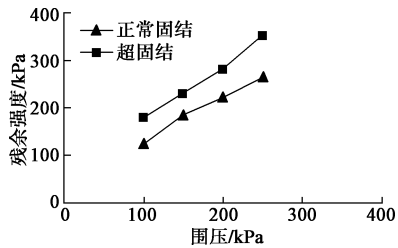


图 7 残余强度与围压的关系曲线

Fig. 7 Relationship between residual strength and confining pressure for normally and over-consolidated soil

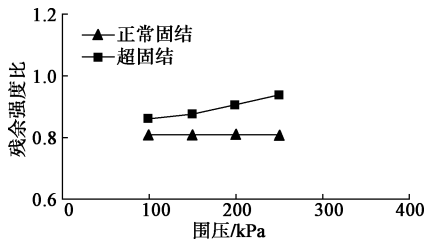


图 8 正常固结和超固结土残余强度比与围压的关系曲线

Fig. 8 Relationship between residual strength and confining pressure for normally and over-consolidated soil

正常固结土和超固结土的有效平均应力 p' 和偏应力 q' 之间的曲线如图 9,10 所示。强度包络线可绘制在 p' - q' 有效应力路径平面上,强度参数由强度包络线求得,强度包络线是一条直线,其方程可以表示为

$$q' = b + p' \tan \alpha = b + Mp' \quad , \quad (1)$$

式中, b 为直线截距, M 为直线斜率, α 为直线与 x 轴的夹角。

内摩擦角为

$$\sin \varphi = \frac{3 \tan \alpha}{6 + \tan \alpha} \quad , \quad (2)$$

黏聚力 c 为

$$c = \frac{3 - \sin \varphi}{6 \cos \varphi} \quad 。 \quad (3)$$

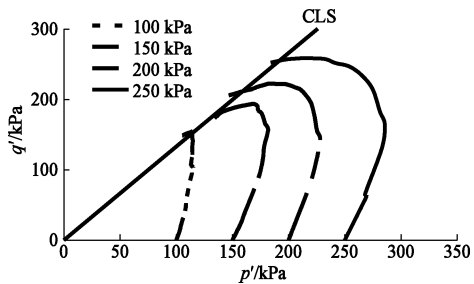


图 9 正常固结土有效应力路径

Fig. 9 Effective stress paths for normally consolidated soil

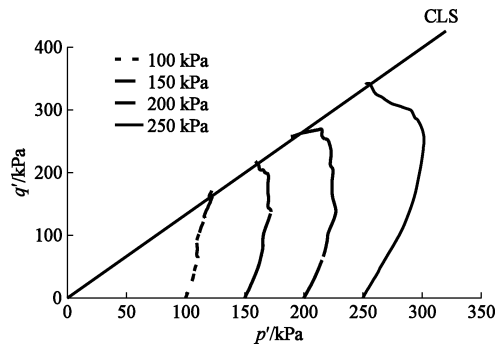


图 10 超固结土有效应力路径

Fig. 10 Effective stress paths for over-consolidation soil

2.4 割线模量

根据前面的分析,可以看出应力-应变关系是非线性的。随着剪切的进行,割线模量不断变小,表现出明显的非线性。这种割线模量不断变小的现象,可以用损伤变量来描述。根据应力-应变关系的试验结果,可以计算出不同围压下的割线模量随应变的变化规律。计算出的最大割线模量通常称为杨氏模量。正常固结土和超固结土在不同围压下的割线模量和应变的关系如图 11,12 所示。

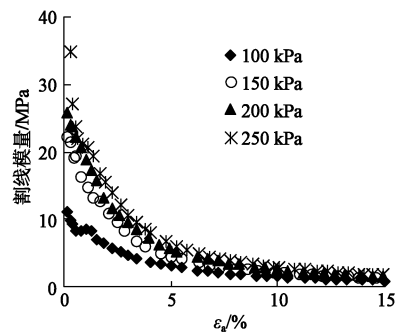


图 11 不同围压下正常固结土割线模量与应变关系曲线

Fig. 11 Secant modulus-strain curves under different confining pressures for normally consolidated soil

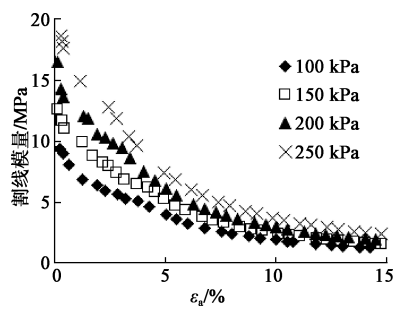


图 12 不同围压下超固结土割线模量与应变关系曲线
Fig. 12 Secant modulus-strain curves under different confining pressures for over-consolidated soil

可以看出围压越大,割线模量越大。随着剪应力的增加,割线模量不断减小;在同一应变下,割线模量随围压的增大而增大。对于正常固结土和超固结土最大割线模量与围压的关系如图 13 所示,结果表明,最大割线模量与围压呈近似线性增长关系。

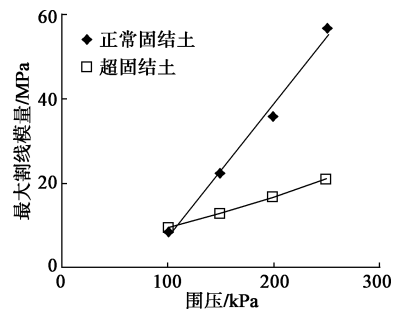


图 13 最大割线模量与围压的关系曲线
Fig. 13 Relationship between maximum secant modulus and confining pressure

2.5 发挥黏聚力和内摩擦角

莫尔-库仑强度准则是岩土材料最常用的强度准则。其强度包络线为直线,材料强度参数设为定值。但大量试验证明,岩土材料在峰值应力状态和残余应力状态下的黏聚力和内摩擦角是不同的。为了进一步研究不同应力状态下黄土强度参数的发挥程度,假定每种应力状态都具有不同的强度平衡状态。根据这一假设,分析不同应力状态下黄土强度参数的发挥程度,建立有效剪应力 $(\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ 与有效法向应力 $(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ 的关系曲线,可计算出黏聚力和内摩擦角。得到不同应力状态下黄土强度参数的发挥程度。

有效内摩擦角 φ' 为

$$\varphi' = \arcsin \tan \theta \quad (4)$$

式中, θ 为任何应力状态下的拟合直线倾角。黏聚力 c' 为

$$c' = \frac{d}{\cos \varphi'} \quad (5)$$

式中, d 为任意应力状态下拟合直线的截距。

依据上述固结不排水三轴试验的试验数据分析黄土发挥黏聚力和内摩擦角的结果如图 14,15 所示。从

图中可以看出,正常固结土和超固结土强度参数的变化与应力-应变状态相对应。内摩擦角随应变的增大而增大。此外,在剪切的初始阶段(应变达到 5% 以前),内摩擦角迅速增大,然后逐渐增大。黏聚力最初阶段随应变的增大而增大,达到最大值,然后随应变的增大而逐渐减小。从黄土强度参数的发挥程度可以看出,黏聚力在剪切过程的初期起主要作用。黏聚力随应变的增大而逐渐减小,内摩擦角最终起主要作用。

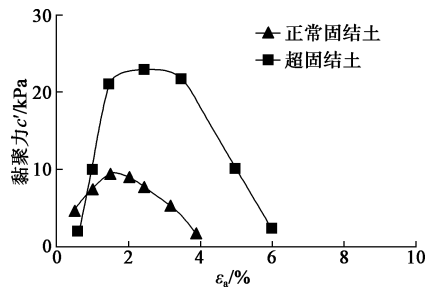


图 14 正常固结和超固结土发挥黏聚力与应变的关系曲线
Fig. 14 Relationship between mobilized cohesion and strain for normally and over-consolidated soil

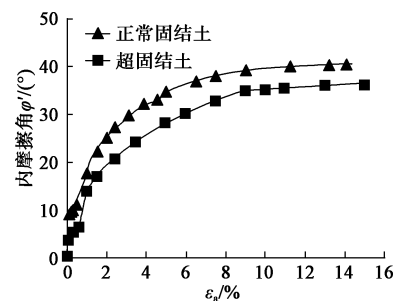


图 15 正常固结和超固结土发挥内摩擦角与应变的关系曲线
Fig. 15 Relationship between mobilized internal friction angle and strain for normally and over-consolidated soil

而且从图 14,15 中可以看出,对于相同应变下的正常固结和超固结黄土的摩擦角相差不大,而黏聚力变化较大,其主要原因是摩擦角的大小主要由土的颗粒分布决定,而黏聚力的大小受应力历史的影响,颗粒之间的黏结和排列发生变化,从而导致黏聚力有较大变化,进而说明了固结历史对黄土强度的影响。

3 结 论

- (1) 正常固结和超固结黄土的应力-应变关系具有应变软化特性;峰值强度和残余强度均随围压的增大而增大。
- (2) 黄土应力-应变关系具有明显的非线性特征。割线模量随剪切过程而减小,随围压的增大而增大;最大弹性模量即杨氏模量与围压基本呈线性关系。
- (3) 对于正常固结土和超固结土,强度参数的变化与应力应变状态相对应。从黄土强度参数的发挥程度可以看出,黏聚力在剪切过程的初期起主导作用。

随着应变的增加,黏聚力迅速增大然后降至零,最终内摩擦角起主要作用。

参考文献:

- [1] 李广信. 高等土力学[M]北京:清华大学出版社,2016. (LI Guang-xin. Advanced Soil Mechanics[M] Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese))
- [2] 张 玉,邵生俊,刘 瑾,等. 平面应变加、卸荷条件下考虑初始应力的原状黄土强度与变形特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, **52**(5): 90 – 100. (ZHANG Yu, SHAO Sheng-jun, et al. Experiment study on strength and deformation characteristics of intact loess considering initial stress under plane strain loading and unloading conditions[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, **52**(5): 90 – 100. (in Chinese))
- [3] 张 玉,何 晖,赵 敏,等. 平面应变条件下原状黄土侧向卸载变形与强度特性分析[J]. 岩土力学, 2017, **38**(5): 1233 – 1242. (ZHANG Yu, HE Hui, ZHAO Min, et al. Analysis of lateral unloading deformation and strength characteristics of intact loess under plain strain condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(5): 1233 – 1242. (in Chinese))
- [4] 周永习,张得煊,罗春泳,等. 饱和黄土静力抗剪强度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **33**(5): 1486 – 1490. (ZHOU Yong-xi, ZHANG De-xuan, LUO Chun-yong, et al. Experimental research on steady strength of saturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics 2010, **33**(5): 1486 – 1490. (in Chinese))
- [5] 方祥位,陈正汉,申春妮,等. 原状 Q2 黄土三轴剪切特性[J]. 岩土工程学报, 2008, **27**(2): 383 – 389. (FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni, et al. Triaxial shear properties of undisturbed loess Q2[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2008, **27**(2): 383 – 389. (in Chinese))
- [6] 李宝平,王 智,张 玉. 关中地区重塑黄土强度特性三轴试验研究[J]. 铁道建筑, 2017, **57**(8): 78 – 82. (LI Bao-ping, WANG Zhi, Zhang Yu. Triaxial test study on strength characteristics of remolded loess in Guanzhong area [J]. Railway Engineering, 2017, **57**(8): 78 – 82. (in Chinese))
- [7] 闫芙蓉,胡雪源,崔 芳. 非饱和黄土抗剪强度特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, **15**(5): 100 – 104. (YAN Fu-rong, HU Xue-yuan, CUI Fang. Experimental study on shear strength characteristics of unsaturated loess [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, **15**(5): 100 – 104. (in Chinese))
- [8] 潘家军,程展林,余 挺,等. 不同中主应力条件下粗粒土应力变形特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(11): 2078 – 2084. (PAN Jia-jun, CHEN Zhang-lin, YU Ting, et al. Experimental study on stress-strain characteristics of coarse-grained soil under different intermediate principal stresses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(11): 2078 – 2084. (in Chinese))
- [9] 马倩倩,刘保健,韩 珏. 原状饱和黄土的应力-应变特性及其归一化研究[J]. 工业建筑, 2016, **46**(2): 68 – 71. (MA Qian-qian, LIU Bao-jian, HAN Yu. Research on stress-strain characteristics and normalization of undisturbed saturated loess [J]. Industrial Construction, 2016, **46**(2): 68 – 71. (in Chinese))
- [10] 张文毅,党进谦,朱彭涛,等. 重塑黄土强度试验研究[J]. 水电能源科学, 2011, **29**(5): 53 – 55. (ZHANG Wen-yi, DANG Jin-qian, ZHU Peng-tao, et al. Strength test analysis of reconstituted loess [J]. Water Resources and Power, 2011, **29**(5): 53 – 55. (in Chinese))
- [11] 姚爱敏,王运霞. 正常固结土与超固结土主要力学性质的比较[J]. 北方工业大学学报, 2007, **19**(1): 86 – 89. (YAO Ai-min, WANG Yun-xia. Comparison of characteristics between normal consolidated soil and over-consolidated soil [J]. Journal of North University of Technology. 2007, **19**(1): 86 – 89. (in Chinese))

(编校:孙振远)