

巴亚东,胡海军,王来才,等等吸力三轴剪切试验中非饱和黄土强度变形及水量变化特性[J].地震工程学报,2019,41(5):1347-1354.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1347

BA Yadong, HU Haijun, WANG Laicai, et al.Characteristics of Strength Deformation and Water Volume Change of Unsaturated Loess in Triaxial Shear Tests under Constant Suction[J].China Earthquake Engineering Journal,2019,41(5):1347-1354.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1347

等吸力三轴剪切试验中非饱和黄土强度变形 及水量变化特性

巴亚东,胡海军,王来才,党进谦

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:通过饱和和原状黄土常规三轴试验和非饱和和原状黄土等吸力三轴试验研究吸力和净围压对非饱和黄土强度变形的影响,并用 HUANG 等、胡冉等和方祥位等提出的土水特征曲线模型分析剪切过程中排水规律。研究表明:等吸力下原状土样固结剪切体积变形随净围压增大而增大;等净围压下原状土样固结剪切体积变形量随吸力的增大基本呈减小趋势。 $p-q$ 平面内饱和土 CSL 线逐渐超过低吸力下非饱和土 CSL 线,原因在于随着 p 值增大,相对于非饱和土,饱和土孔隙比越来越小,较小孔隙比对抗剪强度的贡献逐渐大于非饱和土吸力对抗剪强度的贡献。应用固结稳定的数据拟合出 HUANG 等和胡冉等提出的模型参数,并预测剪切过程中的排水量,发现剪切速率对排水量有影响,这两种模型适用于剪切速率慢,排水充分的情况,而方祥位等提出的模型对不同剪切速率会拟合出不同的参数。

关键词:原状黄土;土水特征曲线;强度特性;变形特性;水量变化

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1347-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1347

Characteristics of Strength Deformation and Water Volume Change of Unsaturated Loess in Triaxial Shear Tests under Constant Suction

BA Yadong, HU Haijun, WANG Laicai, DANG Jinqian

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: In this paper, the effects of suction and net confining pressure on the strength deformation of unsaturated loess were studied. The main test methods included the conventional triaxial test and triaxial test under constant suction for saturated undisturbed loess and unsaturated undisturbed loess, respectively. Additionally, the soil-water characteristic curve models were used to analyze the drainage law at the shear stage. The results showed that the volumetric deformation during the consolidation and shear stages for undisturbed soil increases with increasing net

收稿日期:2018-06-26

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51409220);西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目(2014YB049)

第一作者简介:巴亚东(1991-),男,在读硕士研究生。E-mail:892665632@qq.com。

通信作者:胡海军(1982-),男,博士,讲师,主要从事结构性黄土的宏微观特性、离散元宏微观数值试验方面的研究。

E-mail:hu.hai-jun@163.com。

confining pressure under constant suction; however, it decreases with increasing suction under constant net confining pressure. The CSL line of saturated soil in the p - q plane gradually exceeds that of the unsaturated soil under low suction because with the increase in p value, the void ratio of saturated soil becomes smaller compared with that of unsaturated soil and the contribution of smaller void ratio to shear strength is gradually greater than that of unsaturated soil. The parameter models proposed by Huang et al. and Hu et al. were obtained and used to predict the moisture content during the shear stage. The influence of shear rate on the change of moisture content is apparent; therefore, the two models are suitable for the condition with a slow shear rate and full drainage. The parameters of the model proposed by Fang et al. were different with different shear rates.

Keywords: undisturbed loess; soil-water characteristic curve; strength characteristics; deformation characteristics; water volume changes

0 引言

非饱和黄土的强度变形和持水特性一直是岩土工程领域研究的难点和热点。陈正汉^[1]通过3种控制吸力的应力路径三轴试验对重塑非饱和黄土的强度变形特性进行了较为系统的研究。胡长明等^[2]开展了关于压实黄土的压缩和直剪试验研究,得出了初始含水率和初始压实度对压实黄土强度指标和压缩变形的影响。扈胜霞等^[3]通过开展等吸力非饱和土直剪试验,研究了吸力对非饱和原状黄土强度指标的影响。高登辉等^[4]对延安新区重塑黄土进行了等吸力非饱和土三轴剪切试验,系统研究了干密度和吸力对该地区非饱和黄土的变形强度特性的影响。邵生俊^[5]通过进行饱和和非饱和原状土的等含水率三轴剪切试验,建立了相应条件下的结构性参数,并揭示了黄土结构强度与结构性之间的内在联系。黄土受荷变形后持水特性会发生变化,黄海等^[6]通过一系列吸力增量和净平均应力增量为常数的三轴固结排水试验得到了考虑净平均应力的广义土水特征曲线方程。方祥位等^[7]通过等净平均应力

三轴排水剪切试验在文献[6]的基础上建立了吸力-净平均应力-偏应力-含水量4变量形式的土-水特征曲线。HUANG等^[8]建立了土样进气值随孔隙比变化而变化的土水特征曲线模型。胡冉等^[9]以van Genuchten模型为基础建立了考虑土体变形和滞回效应的土水特征曲线模型。前两种模型以应力为状态变量,后两种模型以孔隙比为状态变量。

综上,前人对等吸力条件下非饱和黄土强度和变形研究已取得了较丰富的成果,而等吸力条件下原状黄土三轴排水剪切试验过程中水量变化规律及模型预测相对较少。对此,本文通过等吸力三轴排水试验,得到杨凌黄土强度变形特性,用胡冉等^[9]、方祥位等^[7]和HUANG等^[8]提出的模型对水量信息进行拟合,并与实测值作比较。

1 试样与试验方案

1.1 试验土体情况

试验所用原状黄土为Q₃黄土,取自陕西杨凌三级阶地党家村一坡顶;取土深度为2~2.5 m左右。其物理性质指标如表1所列。

表1 杨凌黄土基本物理性质指标

Table 1 Basic physical parameters of unsaturated Yangling loess

天然孔隙比 e_0	天然重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	天然含水率/%	比重	ω_L /%	ω_p /%	I_p
0.978	16.06	17.28	2.71	34.80	17.62	17.18

进行三轴试验的原状土样都用削土器制成直径39.1 mm、高80 mm的标准三轴试样。所有试样放到保湿缸中待用。

1.2 试验方案

对杨凌饱和原状黄土和非饱和原状黄土分别进行等吸力等向固结试验和固结剪切试验,试验方案列于表2。本试验试样干密度为 1.37 g/cm^3 ,其容

许差值 $\pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ 。所有试样在开始固结前需进行吸力平衡。为缩短吸力平衡阶段时间,进行天然状态下土样的土水特征曲线试验。具体过程为:利用轴平移技术,在GDS应力路径三轴仪上对高度2 cm(吸水稳定时间短)的试样进行控制吸力的吸湿试验,得到各吸力下试样的水量信息,分析得到天然状态下的土水特征曲线。

表 2 试验方案

Table 2 Experimental scheme

	基质吸力/kPa	固结围压/kPa	最大偏应变%
等向固结试验	0	50,75,100,125,150,200,300,400,600	
	50	100,200,300,400,500	
	100		
	140	100,200,300,400,500,600	
固结剪切试验	50	100,300,500	
	100	100,300,500	15
	140	100,300,500	

为使试样初始吸力值达到试验方案确定的吸力值,根据土水特征曲线应用风干或滴水的方法把试样含水率控制到预定吸力状态,然后进行固结试验。固结稳定标准为试样排水和体变小于 0.01 mL/2h;剪切速率定 0.003 2 mm/min。剪切完成后保持应力状态不变,让试样继续排水稳定(以下简称静置过程)。

2 试验结果及分析

2.1 等向固结变形

图 1 给出了饱和原状和非饱和原状试样等向压缩试验中的 $e-\lg p$ 曲线。由图中可以看出,饱和原状黄土的等向固结屈服应力最小,而非饱和原状黄土的等向固结屈服应力随着吸力值的增大而增加(这与已有的研究结论相同)。根据 Gasagrande 法得到原状饱和和非饱和黄土结构屈服应力 σ_k 。统计 σ_k 列于表 3。

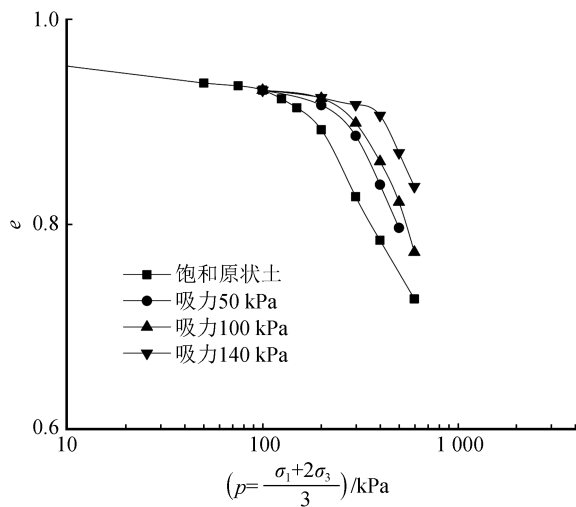


图 1 不同吸力值下杨凌原状黄土三轴压缩 $e-\lg p$ 曲线
Fig.1 The $e-\lg p$ curves from triaxial compression test on Yangling undisturbed loess under different suction values

2.2 剪切过程中体积变形

图 2 给出了饱和原状黄土固结剪切 $e-\lg p$ 关系

曲线,图 3 给出了非饱和原状黄土固结剪切 $e-\lg p$ 关系曲线。从图 3 可以看出,在吸力相等时,原状土样的固结剪切变形量随着净围压的增大而增大;在净围压相等时,原状土样固结剪切变形量随着吸力的增大基本呈减小的趋势,另外饱和土的临界状态线(CSL 线)位于非饱和土下方也说明了这一点。

表 3 饱和和非饱和黄土结构屈服应力

Table 3 Structural yield stress of saturated and unsaturated loess

基质吸力/kPa	0	50	100	140
σ_k /kPa	127	273	295	423

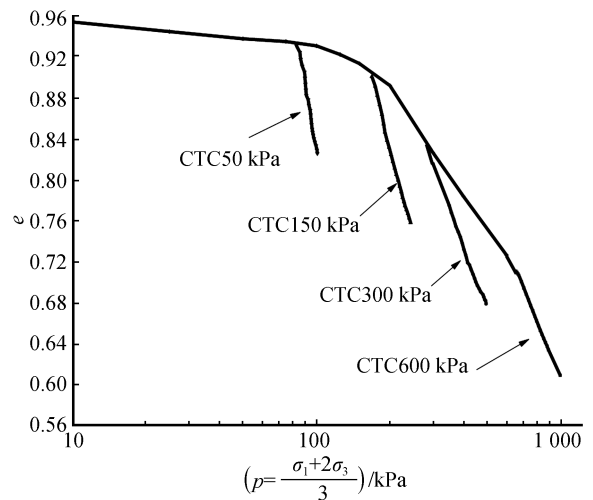


图 2 饱和试样固结剪切 $e-\lg p$ 曲线

Fig.2 The $e-\lg p$ curves during consolidated shear test on saturated samples

2.3 剪切过程应力-应变关系和强度特性

图 4(a)~(d)给出了不同基质吸力条件下常规三轴排水剪切试验所得的轴应变-偏应力曲线。表 4 给出了不同吸力下原状试样固结前后孔隙比。可以很容易发现,在等吸力条件下,试样最大偏应力(抗剪强度)随净围压的增加而增大,也随固结后孔隙比的减小而增大,饱和土也呈现相同规律($s = 0$ kPa)。图 4(e)~(g)给出了等净围压条件下控制不同吸力的三轴排水剪切试验所得的应力-应变关系曲线,结合表 4 可以发现,一般情况下相同净围压

下,试样剪切强度随着基质吸力的增加而增大,但随着固结后孔隙比的减小而减小。说明在此条件下,

吸力增加对抗剪强度的正作用大于孔隙比减小对抗剪强度的正作用。

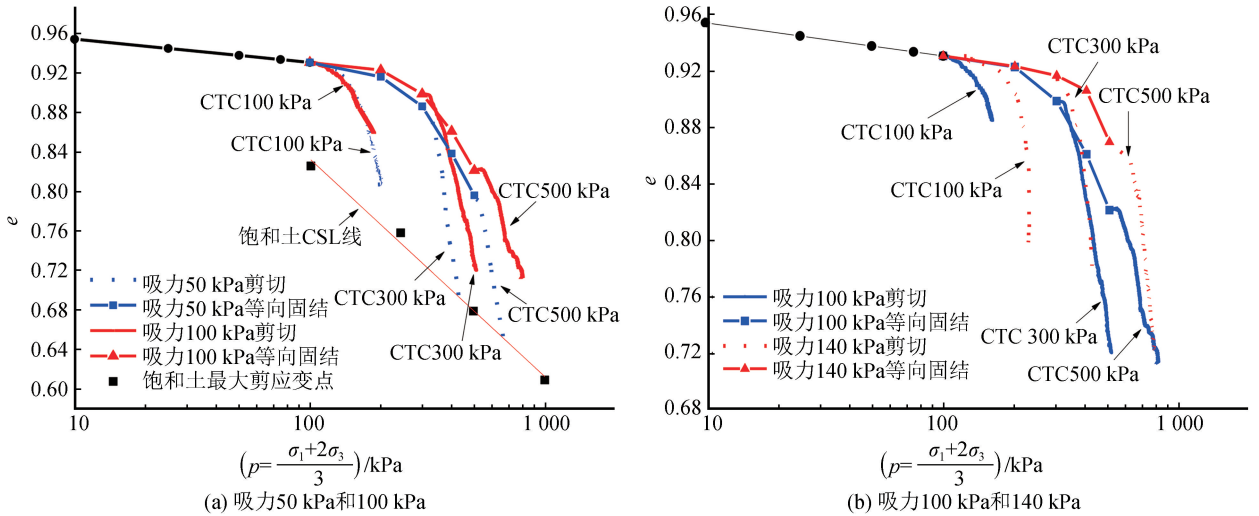


图 3 固结剪切过程中黄土 e - $\lg p$ 空间路径

Fig.3 The e - $\lg p$ curves for loess during consolidated shear test

图 5 给出了各组试样 p - q 空间内的 CSL 线。可以看出,吸力越大 CSL 线越靠上。但是随着 p 值的增加,饱和土的 CSL 线逐渐超过非饱和土,这主要是由于随着 p 值的增加,相同净围压增量使饱和土孔隙比减小的幅度逐渐大于非饱和土,较小孔隙比对抗剪强度的正作用逐渐占优。例如,饱和土在 100 kPa 固结压力下孔隙比减小到 0.907,吸力 50 kPa 下非饱和土在 100 kPa 固结压力下孔隙比减小到 0.908,两者相差 0.001,此时在两者孔隙比几乎相等的情况下吸力对抗剪强度的提高起主要作用,故吸力 50 kPa 非饱和土抗剪强度大于饱和土。当净围压增加到 300 kPa 时,饱和土孔隙比减小到 0.819,50 kPa 非饱和土孔隙比减小到 0.882,两者相差 0.063,此时两者孔隙比相差较大,较小孔隙比对抗剪强度的贡献大于 50 kPa 吸力对抗剪强度的贡献,故在净围压 300 kPa 时,饱和土 CSL 线位于 50 kPa 非饱和土上方。同理,也可以解释吸力 100 kPa 和吸力 140 kPa 的非饱和土出现的类似现象,区别在于吸力值越大对非饱和土抗剪强度贡献越大,饱和土抗剪强度要超过非饱和土就需要更大的孔隙比差值,即饱和土和非饱和土 CSL 线的交叉点越靠后。

2.4 排水量结果分析

应用三种已有的模型对吸力 100 kPa 剪切过程中水量信息进行模拟并进行分析。吸力 100 kPa 剪切过程中水量信息如表 5 所列。

HUANG 等^[8],胡冉等^[9]和方祥位等^[7]提出的土水特征曲线模型公式分别如式(1)~(3):

$$S_e = \left[\frac{\psi_{aevo} 10^{a(e-e_0)}}{\psi} \right]^{[\lambda_0 + d(e-e_0)]} \quad (\psi > \psi_{aevo} 10^{(e-e_0)}) \quad (1)$$

式中: λ_0 为初始孔隙比 e_0 情况下的 Brook-Corey 模型参数; ψ 为基质吸力, ψ_{aevo} 为初始孔隙比 e_0 情况下的进气值, $\psi_{aevo} 10^{a(e-e_0)}$ 为孔隙比为 e 时的进气值; a 、 d 为反映孔隙比变化的模型参数。

$$S_{e,w} = \{1 + [\beta_w \exp(k_p e) s]^n\}^{-m} \quad (2)$$

式中: $S_{e,w} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$ 为主吸湿过程有效饱和度, θ_s 为某个应力状态下土样的饱和体积含水率(通常增湿到饱和状态时的饱和度为 0.85^[10-11],这里取 0.85), θ 为实际体积含水率, θ_r 为残余体积含水率; s 为基质吸力; e 为某应力状态下的孔隙比; n 、 $m = 1 - \frac{1}{n}$ 、 $\beta_w = \alpha \exp(-k_p e_0)$ 、 k_p 均为模型参数,其中 α 、 n 、 θ_r 为相应 van Genuchten(VG) 模型参数。

$$w = w_0 - ap - b \ln \left(\frac{s + p_{at}}{p_{at}} \right) - cq \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 均为常数,通过拟合得到。 w_0 为初始含水率; p 、 q 分别为试验过程中某应力状态下的净平均应力和偏应力。

首先用式(1)和式(2)对增湿情况下初始试样的持水曲线进行拟合,得到HUANG等提出模型中

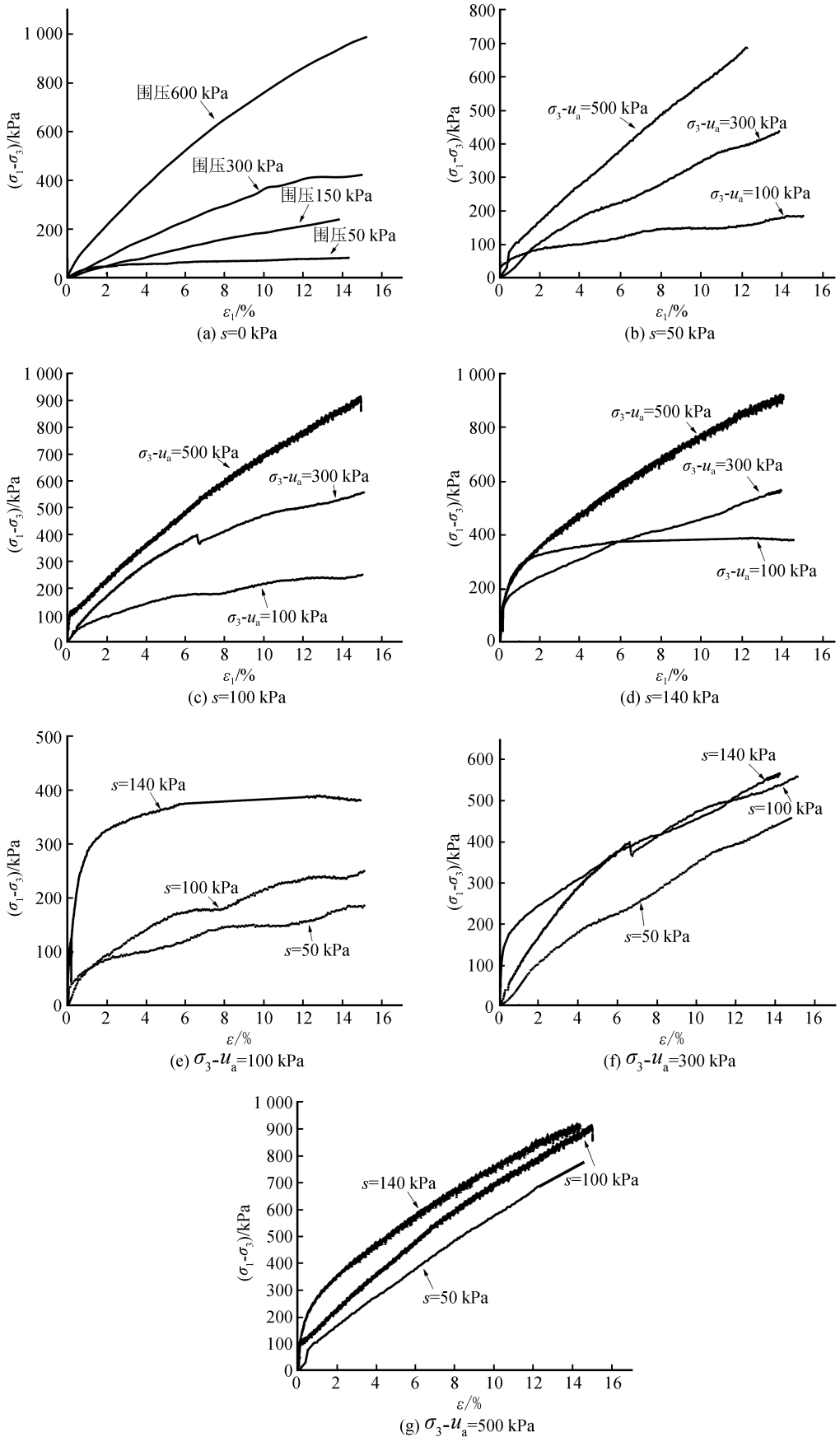


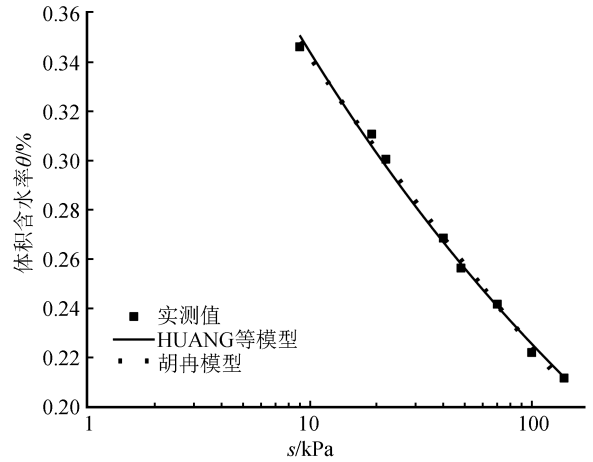
图 4 原状黄土 $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_1$ 关系曲线

Fig.4 $(\sigma_1-\sigma_3)-\varepsilon_1$ relation curve of undisturbed loess

表4 不同吸力下原状试样固结前后孔隙比

Table 4 Void ratio of undisturbed samples before and after consolidation under different suction

基质吸力/kPa	净围压/kPa	固结前孔隙比	固结后孔隙比
0	100	0.979	0.907
	300	0.980	0.819
	500	0.978	0.685
50	100	0.976	0.908
	300	0.973	0.882
	500	0.973	0.769
100	100	0.979	0.922
	300	0.979	0.895
	500	0.978	0.785
140	100	0.974	0.936
	300	0.978	0.922
	500	0.978	0.831



(a) 原状黄土土水特征曲线

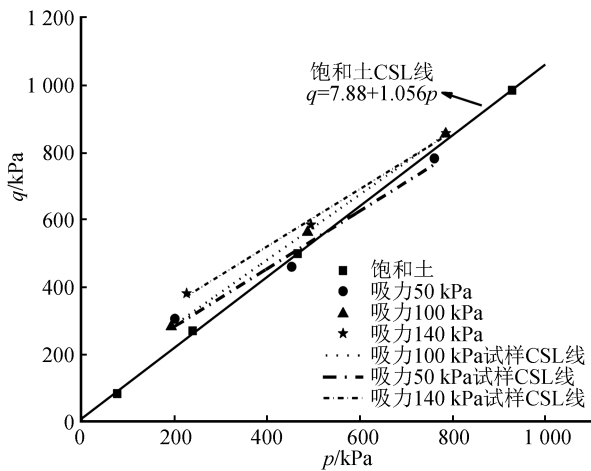
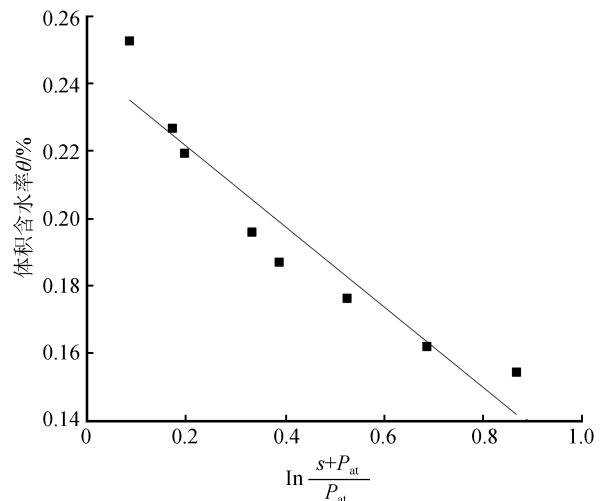


图5 黄土 p-q 空间内 CSL 线

Fig.5 CSL line in loess p-q space



(b) 参数 b、w₀ 拟合

图6 拟合结果

Fig.6 Fitting results

表5 剪切前后水量信息 (基质吸力 100 kPa)

Table 5 Water information before and after shearing test

参数	净围压/kPa		
	100	300	500
剪切前含水率/%	16.2	16.03	15.6
剪切前孔隙比	0.93	0.89	0.79
剪切排水/g	0.562	0.313	0.214
剪切后含水率/%	15.7	15.00	14.39
剪切后孔隙比	0.87	0.72	0.69
静置排水量	-	0.243	0.059
静置后含水率/%	-	14.82	14.21

的参数 ψ_{aevo} 、 λ_0 和胡冉等提出的模型中的参数 a 、 m 、 n 、 θ_r ，拟合结果如图 6(a)，参数如表 6 所示。在 $\ln \frac{s + p_{at}}{p_{at}} - w$ 平面内，利用式 (3) 对初始试样的持水曲线进行拟合，得到方祥位等提出的模型参数 b 、 w_0 ，其拟合结果如图 6(b)，得到的参数如表 6 所示。可见方祥位等提出的模型与前两个模型相比，精确度稍差。

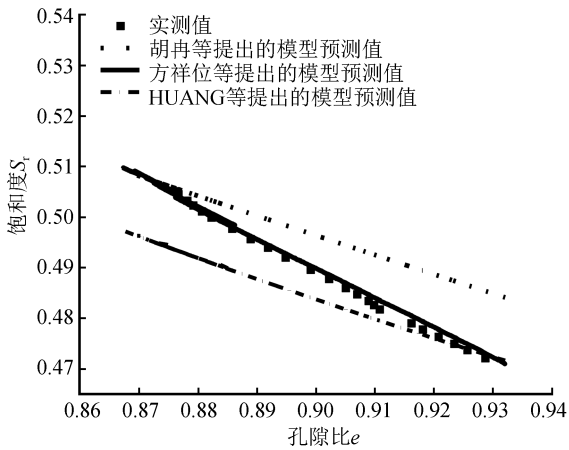
针对剪切过程，分别使用式 (1)、(2) 对剪切前 (固结后) 的含水量信息进行拟合，得到 HUANG 等的模型中的参数 a 、 d 和胡冉的模型参数 k_p 。针对方祥位等提出的模型，根据已知参数将剪切前 (固结后) 的含水率及相应的应力代入式 (3)，可计算出参数 a ，再用式 (3) 对剪切过程中的水量信息进行拟合，得到三组不同应力状态下的 c 值，每组平均值分别为 c_1 、 c_2 、 c_3 ，求得三个值的平均值作为最终的参数 c 。所得模型参数如表 6 所示。

应用 HAUNG 等、胡冉等和方祥位等提出的模型和对剪切过程的水量变化进行预测并和试验实测值进行比较 (图 7)。在剪切完成后，保持应力状态不变 (静置)，等待试样水量变化稳定，据此计算出静置后的饱和度并标在图中，如图 7(b)、(c)。可以看出静置后的饱和度实测值更接近胡冉模型和

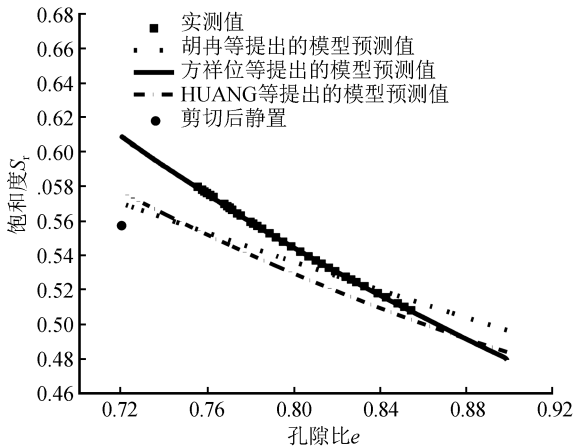
表 6 模型参数

Table 6 Parameters of model

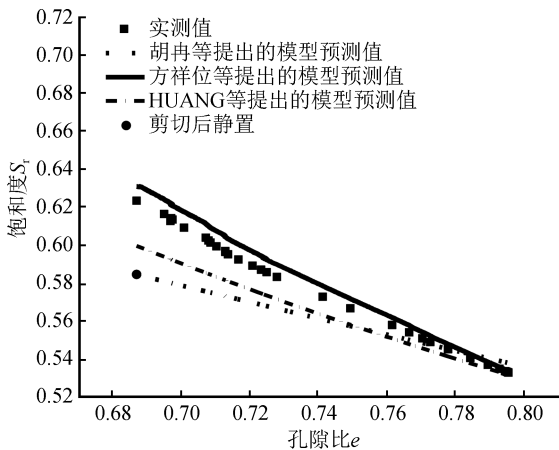
模型	参数			
HUANG 等提出的模型	$\psi_{sev0} = 3.371$	$\lambda_0 = 0.183$	$a = 1.157$	$d = 0.343$
胡冉等提出的模型	$n = 1.23$	$\alpha = 0.027$	$\theta_r = 0.071$	$k_p = 3.827$
方祥位等提出的模型	$\omega_0 = 0.245$	$\alpha = 1.452 \times 10^{-5}$	$b = 0.119$	$c = -9.395 \times 10^{-6}$



(a) 净围压100 kPa



(b) 净围压300 kPa



(c) 净围压500 kPa

图 7 含水量实测值与模型预测值对比

Fig.7 Comparison between measured and predicted water content

HAUNG 等模型预测值,说明剪切过程中,部分水量未及时排出,即剪切速率较大。由于方祥位等提出的模型使用剪切过程数据拟合得到参数,故其参数值受剪切速率影响。

3 总结

通过对原状饱和和非饱和黄土等吸力三轴固结排水剪切试验结果进行分析,得出以下结论:

(1) 在吸力相等时,原状土样的固结剪切体积变形量随着净围压的增大而增大;在净围压相等时,原状土样固结剪切体积变形量随着吸力的增大基本呈减小的趋势。

(2) $p-q$ 平面内饱和土和非饱和土 CSL 线会出现交叉现象,即随着 p 值增大,饱和土最大偏应力会逐渐大于非饱和土。原因在于随着 p 值的增大,相同净围压增量下,饱和土孔隙比减小量会逐渐大于非饱和土。小孔隙比对抗剪强度的贡献逐渐大于非饱和土吸力对抗剪强度的贡献。

(3) 剪切静置后试样的饱和度实测值更接近胡冉模型和 HAUNG 模型预测值,说明剪切速率过大,土中水未完全排出,所以为了使剪切过程中变形和排水相协调,必须使用足够小的剪切速率。另外也可以看出方祥位的模型拟合参数会随剪切速率的变化而变化。

参考文献(References)

[1] 陈正汉.非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J].岩土工程学报,2014,36(2):201-272.
CHEN Zhenghan.On Basic Theories of Unsaturated Soils and Special Soils[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,36(2):201-272.

[2] 胡长明,梅源,王雪艳.吕梁地区压实马兰黄土变形与抗剪强度特性[J].工程力学,2013,30(10):108-114.
HU Changming, MEI Yuan, WANG Xueyan. Deformation and Shearing Strength Characteristic of Compacted Malan Loess in L(U)liang Region[J].Engineering Mechanics, 2013, 30(10): 108-114.

[3] 扈胜霞,周云东,陈正汉.非饱和原状黄土强度特性的试验研究[J].岩土力学,2005,26(4):660-672.
HU Shengxia, ZHOU Yundong, CHEN Zhenghan. Test Study on Strength Character of Unsaturated and Undisturbed Loess

- [J].Rock and Soil Mechanics,2005,26(4):660-672.
- [4] 高登辉,陈正汉,郭楠,等.干密度和基质吸力对重塑非饱和黄土变形与强度特性的影响[J].岩石力学与工程学报,2017,36(3):736-744.
GAOD enghui, CHEN Zhenghan, GUO Nan, et al. The Influence of Dry Density and Matric Suction on the Deformation and the Strength Characteristics of the Remolded Unsaturated Loess Soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 736-744.
- [5] 邵生俊.黄土的结构性参数、强度特性及弹塑性本构模型[C]//第一届全国岩土本构理论研讨会论文集.2008:246-254.
SHAO Shengjun. Structural Parameter, Strength Property and Elastic-plastic Constitutive Model of Loess[C]// . 2008: 246-254.
- [6] 黄海,陈正汉,李刚.非饱和土在 $p-s$ 平面上屈服轨迹及土-水特征曲线的探讨[J].岩土力学,2000,21(4):316-321.
HUANG Hai, CHEN Zhenghan, LI Gang. A Study on Yield Locus of Unsaturated Soils on $p-s$ Plane and Soil-Water Characteristic Curve[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 316-321.
- [7] 方祥位,陈正汉,申春妮,等.剪切对非饱和土土-水特征曲线影响的探讨[J].岩土力学,2004,25(9):1451-1454.
FANG Xiangwei, CHEN Zhenghan, SHEN Chunni, et al. A Study on Effect of Shear on Soil-Water Characteristic Curve of an Unsaturated Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1451-1454.
- [8] HUANG S Y, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Development and Verification of a Coefficient of Permeability Function for a Deformable Unsaturated Soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, 35(3): 411-425.
- [9] 胡冉,陈益峰,周创兵.基于孔隙分布的变形土土水特征曲线模型[J].岩土工程学报,2013,35(8):1451-1462.
HU Ran, CHEN Yifeng, ZHOU Chuangbing. A Water Retention Curve Model for Deformable Soils Based on Pore Size Distribution [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1451-1462.
- [10] 胡海军,李常花,崔玉军,等.增湿情况重塑黄土非饱和和渗透系数的测定方法研究[J].水利学报,2018,49(10):1216-1226.
HU Haijun, LI Changhua, CUI Yujun, et al. Research on the Determination of Permeability Coefficient of Unsaturated Remolded Loess under Wetting Condition [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(10): 1216-1226.
- [11] 张华,吴争光.封闭气泡对一维积水入渗影响的试验研究[J].岩土力学,2009,30(增刊2):132-137,148.
ZHANG Hua, WU Zhengguang. Experimental Research on the Effect of Entrapped Air on One-Dimensional Ponded Water Infiltration [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (Supp2): 132-137, 148.