

非饱和原状黄土的变形及屈服特性试验研究*

张登飞^{1,2}, 陈存礼^{1,2}, 于佃博³

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 西安 710048; 2. 西安理工大学 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 西安 710048; 3. 山东德建集团有限公司, 山东 德州 253000)

摘要: 对不同吸力非饱和原状黄土进行了等应力比三轴压缩及常规三轴剪切路径下的试验, 研究了偏应力比 q/p (q 及 p 分别为净平均应力及偏应力), 吸力及净围压对不同应力路径下变形及屈服特性的影响。研究表明: 在等应力比三轴压缩及常规三轴剪切过程中, 孔隙比 e 与净平均应力 p 关系 ($e-\ln p$) 皆位于二条相交的直线上, 吸力、偏应力比及净围压对弹性指数的影响很小, 对屈服应力及压缩指数的影响较大。等应力比三轴压缩路径下, 偏应力比一定时, 屈服应力及压缩指数皆随吸力的增大而增大; 吸力一定时, 随偏应力比的增大而先增大后减小。常规三轴剪切路径下, 吸力一定时, 屈服应力及压缩指数皆随净围压的增大而增大; 净围压一定时, 随吸力的增大, 屈服应力增大, 压缩指数减小。以塑性体应变作为硬化参数时, $q-p$ 平面上的初始及后继屈服面皆为对称于饱和土 K_0 线的倾斜椭圆, 吸力及应力增大时, 屈服面没有旋转, 而是产生等向扩大。

关键词: 非饱和原状黄土; 吸力; 等应力比三轴压缩; 常规三轴剪切; 变形和屈服

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0358-07

Experimental Study on Deformation and Yielding Characteristics for Unsaturated Intact Loess

Zhang Dengfei^{1,2}, Chen Cunli^{1,2}, Yu Dianbo³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P.R. China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P.R. China; 3. Shandong Dejian Group Co., Ltd., Dezhou, Shandong 253000, P.R. China)

Abstract: A series of triaxial tests under different stress paths were performed on intact loess with different suctions, including constant stress ratio triaxial compression and conventional triaxial shear. The influences of suction, deviatoric stress ratio (q/p , q , p are respectively net mean stress and deviatoric stress) and net confining pressure on the deformation and yielding under different stress paths were investigated. The results showed that during constant stress ratio triaxial compression and conventional triaxial shear, the data of void ratio (also called e) versus the net mean stress ($e-\ln p$) were lies on the two intersecting lines. The suction and deviatoric stress ratio as well as net confining pressure had little influence on the elastic index, but large influence on the yield stress and compression index. Under constant stress ratio triaxial compression stress path, the yield stress and the compression index increased consistently with suction for a certain stress ratio, and firstly increased and then decreased with the increase

* 收稿日期: 2018-10-12(修改稿)

作者简介: 张登飞(1987-), 男, 陕西西安人, 博士生, 主要从事非饱和土工程特性研究。

E-mail: dfzhang1987@163.com

通讯作者: 陈存礼(1964-), 女, 陕西西安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土静动力学特性研究。

E-mail: chencl@xaut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(50878183); 陕西省教育厅省级重点实验室重点科研项目(14JS063); 西安理工大学博士创新基金(310-252071509)

of deviatorics tress ratio for a certain suction. Under conventional triaxial shear stress path, the yield stresses and the compression index increased with net confining pressures for a certain suction, and decreased with the increase of suction for a certain net confining pressures. Using plastic volumetric strain as the hardening parameter, the shapes of the initial and subsequent yield curves on the q - p plane were near skewed ellipses centered on K_{0w} line of the saturated soil. The isotropic expansion of the yielding curves occurred with the increase of the suction or stress, without any rotation of the axis.

Keywords: unsaturated intact loess; suction; constant stress ratio triaxial compression; conventional triaxial shear; deformation and yielding

0 引言

基于各向同性重塑饱和粘土变形特性,Roscoe 等^[1]提出屈服面以平均应力为对称轴的椭圆。然而,非饱和土屈服特性的研究结果,尚存在认识上的差异。如 Alonso 等^[2]、Wheeler 等^[3]假定常吸力下屈服面与修正剑桥模型相似,为对称于净平均应力轴的椭圆,且椭圆与净平均应力轴交点对应的应力随吸力增大而增大,屈服面随吸力增大而向外扩展,并有试验结果^[4]证实这一假定。而已有试验研究结果揭示的非饱和土屈服面形状不尽相同。如,基于等向压缩和控制净围压的非饱和土三轴剪切试验结果,表明了重塑湿陷性非饱和粉土的屈服面为偏应力快速增大而球应力缓慢增大的曲线^[5],非饱和压实粉土^[6]及原状黄土^[7]的屈服面皆为对称于 K_0 的椭圆,而 K_0 线下方区域的形状并

未得到试验验证,非饱和重塑黄土的屈服面为在 K_0 线之上随吸力增大而向外扩展的直线^[8]。可见,对非饱和土屈服面的试验研究相对较少,且研究对象多为重塑土,仍需对更多土(尤其原状土)进行深入的试验研究。为此,本文以 Q_3 原状黄土作为研究对象,进行控制吸力的等应力比三轴压缩试验,控制吸力及净围压的常规三轴剪切试验,研究不同应力路径下原状黄土的变形及屈服特性。

1 试验方案与方法

1.1 试验土样

试验用土为 Q_3 原状黄土,其物理性质指标见表 1,按塑性指数分类定名为粉质粘土。用专门的三轴削样器,切削直径 3.91 cm、高度 8 cm 的试样。选取干密度平均值为 1.28 g/cm^3 ,差值小于 0.03 g/cm^3 的试样,以减小干密度差异的影响。

表 1 原状 Q_3 黄土的物理性质
Table 1 Physical properties of intact Q_3 loess

土粒 相对 密度 G_s	含 水 率 $w_n/\%$	干密度 ρ_{d0} $/(g \cdot cm^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	颗粒组成/ $\%$		
					>0.075 / mm	$0.075 \sim 0.005$ / mm	<0.005 / mm
2.70	15.2	1.28	30.9	19.8	4	73	23

1.2 试验方案

为研究不同应力路径下不同吸力原状黄土的变形及屈服特性,共进行 2 种类型的应力路径三轴试验:

1.2.1 控制吸力的等应力比三轴排水压缩试验

在不同偏应力比 η ($\eta = q/p, q = \sigma_1 - \sigma_3, p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$, 其中 σ_1 、 σ_3 分别为净轴向应力和净围压)下,对不同吸力原状黄土进行控制吸力的等应力比三轴排水压缩试验。应力比 $K = \sigma_3/\sigma_1$ 时,

$\eta = 3(1-K)/(1+2K)$, 控制的 η 分别为 0, 0.15, 0.35, 0.62, 0.90, 对应的 K 分别为 1, 0.86, 0.72, 0.56, 0.44, 其中 $\eta = 0$ ($K = 1$) 的试验为等向压缩试验。

1.2.2 控制吸力和净围压常规三轴排水剪切试验

在不同净围压下,对不同湿度原状黄土进行控制吸力和净围压的常规三轴排水剪切试验。控制的净围压 σ_3 分别为 50、100、200、400 kPa。

上述 2 种类型试验中,控制的吸力 s 皆分别为

50、100、200 kPa。

1.3 试验仪器及方法

试验仪器为西安力创试验仪器有限公司与西安理工大学岩土工程研究所联合研制的微机控制三轴试验仪,根据非饱和土三轴试验要求进行了改造,具体仪器结构及功能详见文献[7]。

无应力作用时,用轴平移方法测定出天然含水率($w_n = 15.2\%$)试样的吸力为 175 kPa,吸力 s 为 200、100、50 kPa 所对应的试样含水率 w 分别为 14.0%、17.0%、21.8%。为缩短吸力平衡时间,在试验前,通过增湿或减湿的方法,使试样的含水率由天然含水率 w_n 变为控制吸力对应的含水率 w ,再密闭静置 72 h 以上,使水分平衡。

等应力比三轴压缩试验包括吸力平衡和等应力比加载 2 个阶段。在吸力平衡阶段,首先同步向试样内外分别施加气压及围压,使气压(孔隙气压 u_a)达到控制的吸力 s ,净围压为 5 kPa(为了使乳胶膜紧贴试样)时,打开排水阀。当与试样底部陶土板相连通的排水管的排(吸)水量达到稳定标准时,即达到吸力平衡。在等应力比加载阶段,分级施加净围压和净轴向应力,净围压 σ_3 加载等级为 12.5、25、50、100、200、300、400、500、600 kPa,根据试验方案设定的偏应力比计算控制的净轴向应力 σ_1 。由于三轴压力室的承压能力所限, $s = 200$ kPa 时,施加的最大净围压由 600 kPa 调整为 500 kPa。待试样的轴向变形,体变和排(吸)水皆达到稳定时,方可加载下一级。

控制吸力及净围压的常规三轴剪切试验包括吸力平衡、等向压缩及三轴剪切 3 个阶段。在等向压缩阶段,吸力保持不变,施加控制的净围压,待试样的体变及排水达到稳定后,即可进入保持吸力 s 和净围压 σ_3 不变的三轴剪切阶段。剪切时,采用等应变方式加载,应变加载速率为 0.004 mm/min。

等应力比三轴压缩及等向压缩稳定标准为轴向变形增量小于 0.005 mm/h,体变增量和排水增量皆小于 0.012 cm³/2 h。

2 不同应力路径下原状黄土变形特性

2.1 等应力比三轴压缩路径下原状黄土的变形特性

不同吸力 s 及偏应力比 η 下,典型的孔隙比 e 与净平均应力 p 间 $e-\ln p$ 曲线如图 1。可以看出:

(1)在不同偏应力比 η 下加载过程中,净平均

应力 p 及偏应力 q 逐渐增大,使不同吸力土样产生体积变形,孔隙比 e 逐渐减小。 $e-\ln p$ 关系近似位于两段相交的直线上,交点处的应力即为等应力比压缩路径下屈服应力(q_y, p_y), q_y, p_y 分别为屈服偏应力及屈服净平均应力。

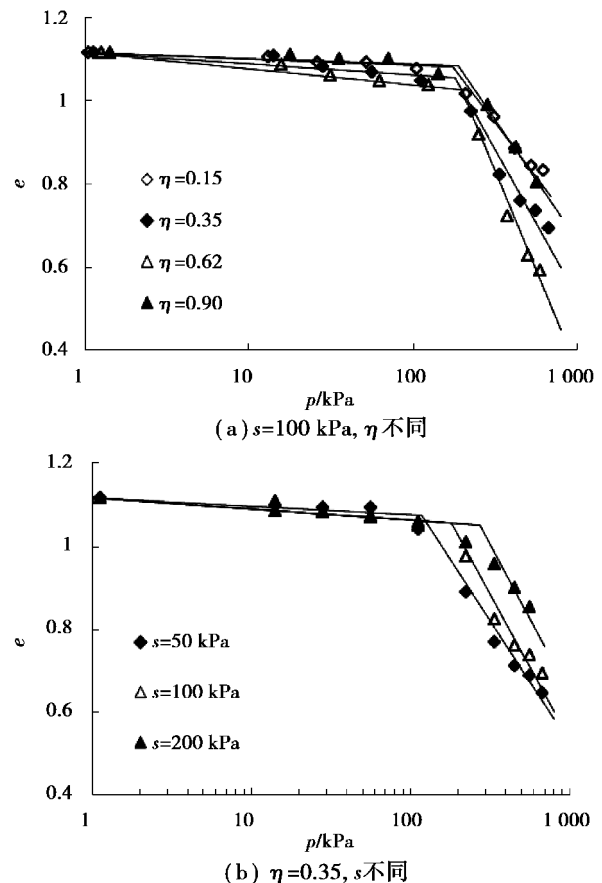


图 1 等应力比三轴压缩试验的 $e-\ln p$ 曲线

Fig. 1 $e-\ln p$ curves from constant stress ratio triaxial compression tests

(2)吸力 s 相同时,偏应力比 η 对 $e-\ln p$ 关系的影响与净平均应力 p 的大小有关。 $p \leq p_y$,即试样屈服前, η 对 $e-\ln p$ 关系(图 1(a))的影响很小,直线的斜率-弹性指数 $\kappa(s)$ 基本上与 η 无关(见表 2)。 $p > p_y$ (即屈服后), η 的影响较大, q_y, p_y 及直线的斜率-压缩指数 $\lambda(s)$ 随 η 的不同而不同(见表 2),即相同净平均应力作用下,孔隙比随偏应力比的变化而变化,说明应力路径对土的体变特性有明显的影响。这与软粘土^[9]的试验研究结果相一致。

(3) η 相同时, s 对 $e-\ln p$ 关系的影响与净平均应力 p 的大小有关。 $p \leq p_y$ (即屈服前), s 的影响很小(图 1(b)), $\kappa(s)$ 与 s 几乎与无关(见表 2)。 $p > p_y$ (即屈服后), s 的影响较大, q_y, p_y 及 $\lambda(s)$ 皆随 s

的变化而变化(见表 2)。

上述可见,吸力及应力比对弹性指数 $\kappa(s)$ 的影响很小,可以忽略不计,而对净平均屈服应力 p_y 及压缩指数 $\lambda(s)$ 的影响较大。不同 s 下, p_y - η , $\lambda(s)$ - η 关系如图 2 所示。可以看出:

(1)对于不同 s ,随 η 的增大, p_y 及 $\lambda(s)$ 皆先增大后减小,且在 $\eta=0(K=0)$,即等向压缩时为最小值, $\eta=0.62(K=0.56)$ 时达到最大值,达到最大值时的 K 值与按 Jkay 公式确定的饱和原状黄土静止侧压力系数 $K_{0w}(=1-\sin\varphi'=0.56, \varphi'=25.8^\circ)^{[10]}$ 值相等。这与不同等应力比路径下软粘土的变形特性^[9]相一致,可能是由于等应力比压缩路径下偏应力的作用所致^[9]。偏应力的增大一方面使净平均应力增大,另一方面又加剧了土结构的破坏,其对 p_y 及 $\lambda(s)$ 的影响与 η 的大小(即偏应力所占的比例)有关;当 η 小于一定值时,偏应力的增大对增大净平均应力的贡献要大于对土结构的破坏作用,则 η 越大, p_y 越大, $\lambda(s)$ 越大; η 大于一定值时,偏应力的增大对净平均应力的贡献小于对土结构的破坏作用,则 η 越大, p_y 越小, $\lambda(s)$ 越小。

表 2 等应力比三轴压缩试验的土性参数

Table 2 Soil parameters from constants tress ratios traiaxial compression tests

s /kPa	η	K	p_y /kPa	q_y /kPa	κ/s	λ/s
50	0	0	104	0	0.011	0.200
	0.15	0.86	110	17	0.008	0.206
	0.35	0.72	123	43	0.009	0.209
	0.62	0.56	125	78	0.010	0.330
	0.90	0.44	72	65	0.010	0.264
100	0	0	123	0	0.008	0.215
	0.15	0.86	183	27	0.008	0.217
	0.35	0.72	200	70	0.011	0.224
	0.62	0.56	220	136	0.012	0.337
	0.90	0.44	202	182	0.013	0.273
200	0	0	166	0	0.007	0.232
	0.15	0.86	220	33	0.008	0.233
	0.35	0.72	310	109	0.012	0.247
	0.62	0.56	325	202	0.014	0.341
	0.90	0.44	280	252	0.014	0.324

(2) p_y - η , $\lambda(s)$ - η 关系曲线皆随吸力 s 的增大

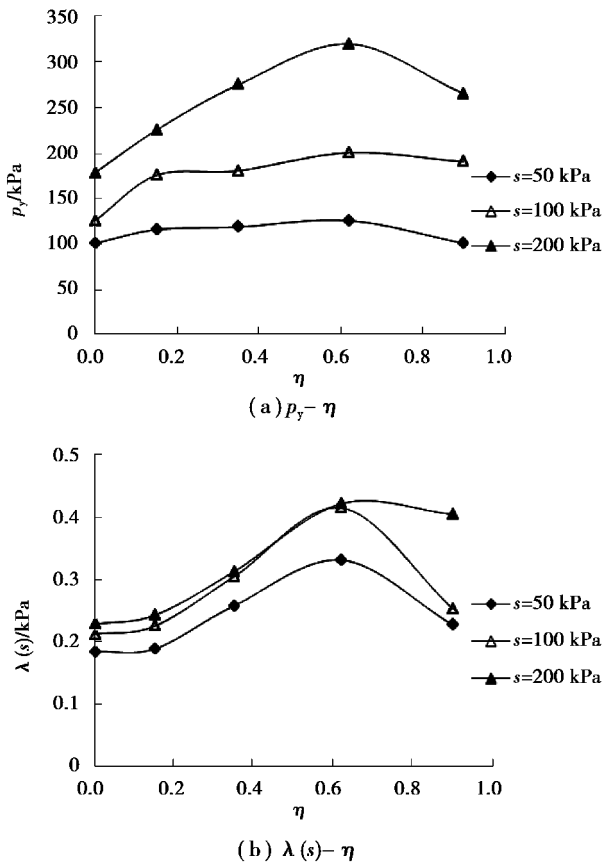


图 2 等应力比三轴压缩试验的 p_y - η 及 $\lambda(s)$ - η 曲线

Fig. 2 p_y - η and $\lambda(s)$ - η curves

from constant stress ratio triaxial compression tests

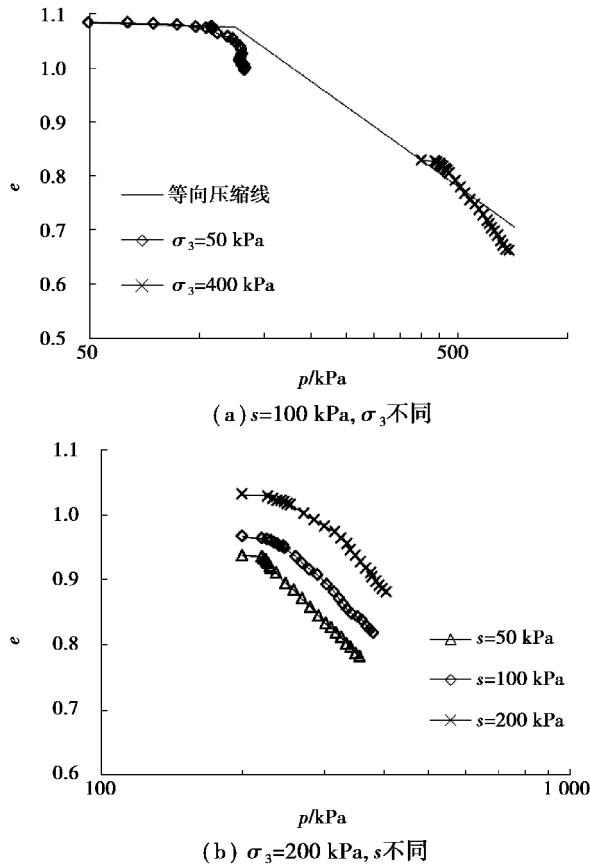
而上移,表明不同偏应力比 η 下, p_y 及 $\lambda(s)$ 皆随吸力的增大而增大。

2.2 常规三轴剪切应力路径下原状黄土的变形特性

不同的净围压及吸力下,常规三轴剪切过程中孔隙比 e 与净平均应力 p 间 e - $\ln p$ 关系的典型曲线如图 3 所示。可以看出:

(1)不同净围压 σ_3 及吸力 s 下, e - $\ln p$ 曲线皆由平缓 and 快速下降二个阶段组成,随吸力及净围压的增大,平缓段范围减小。试验点位于两条相交的直线上,交点处的应力为剪切初始屈服应力-净平均应力 p_y 和偏应力 $q_y(q_y=3(p_y-\sigma_3))$ 。

(2)吸力相同时(图 3(a)),当 σ_3 小于等向压缩($K=0$)屈服应力 p_{yi} 时,剪切前(等向压缩后)试样结构未屈服, e - $\ln p$ 曲线的平缓段较长,且近似沿着屈服前的等向压缩线。当 σ_3 大于 p_{yi} 时,剪切前试样的结构已屈服,导致曲线的平缓段很短。屈服后陡降段斜率 $\lambda(s)$ 比等向压缩条件下大。

图3 常规三轴剪切试验的 e - $\ln p$ 曲线Fig. 3 e - $\ln p$ curves from conventional triaxial shear tests

(3) 净围压 σ_3 相同时(图 3(b)), 随着吸力 s 的增大, e - $\ln p$ 关系曲线上移, 平缓段范围增大, 剪切初始屈服净平均应力 p_y 逐渐增大, 陡降段逐渐变缓。

不同条件下, 剪切初始屈服净平均应力 p_y 及屈服前后 e - $\ln p$ 直线的斜率 $\kappa(s)$ 为弹性指数, $\lambda(s)$ 为压缩指数见表 3。可见:

(1) 不同 s 及 σ_3 下, $\kappa(s)$ 介于 0.008~0.018 之间, 平均值为 0.012, 且与等应力压缩路径下 $\kappa(s)$ 的平均值(0.010)相差很小, 则可以忽略 s 、 σ_3 及应力路径对 $\kappa(s)$ 的影响。

(2) 对于不同的 s 、 p_y 及 $\lambda(s)$ 皆随 σ_3 的增大而增大, 即 σ_3 越大, 剪缩性越大。对于不同的 σ_3 , 随着 s 的增大, p_y 增大, 而 $\lambda(s)$ 减小, 这与等应力压缩路径下, s 越大, $\lambda(s)$ 越大的规律不同, 表明不同应力路径下吸力对变形特性指标的影响规律不同。

(3) 不同 s 及 σ_3 下, $\lambda(s)$ 皆比等应力比三轴压缩路径下大, 表明对于相同的净平均应力增量, 常规三轴剪切比等应力比三轴压缩条件下体变增量。

表3 常规三轴剪切试验的土性参数
Table 3 Soil parameters from conventional triaxial shear tests

s/kPa	σ_3/kPa	p_y/kPa	q_y/kPa	κ/s	λ/s
50	50	75	75	0.010	0.266
	100	120	60	0.011	0.280
	200	220	60	0.012	0.321
	400	440	120	0.013	0.419
100	50	108	174	0.009	0.253
	100	153	159	0.010	0.270
	200	230	90	0.009	0.295
	400	450	150	0.012	0.375
200	50	120	210	0.008	0.242
	100	174	222	0.009	0.252
	200	250	150	0.015	0.273
	400	460	180	0.018	0.366

3 屈服特性

由于

$$d\varepsilon_v = -\frac{de}{1+e_0} \quad (1)$$

则可以根据常吸力加载时 e - $\ln p$ 关系的两段直线斜率(参数 $\kappa(s)$, $\lambda(s)$)确定体积应变增量。由于吸力及应力对 $\kappa(s)$ 的影响皆很小, 可取其平均值, $\kappa(s) = 0.010$ 。

常吸力($ds=0$)下加载时, 弹性体应变增量 $d\varepsilon_v^e$ 的表达式为:

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa(s)}{1+e_0} \frac{dp}{p} \quad (2)$$

净平均应力 p 大于屈服净平均应力 p_y , 应力增量为 dp 时, 对应的体应变增量 $d\varepsilon_v$ 表达式为:

$$d\varepsilon_v = \frac{\lambda(s)}{1+e_0} \frac{dp}{p} \quad (3)$$

由式(2)、式(3)得到塑性体应变增量 $d\varepsilon_v^p$ 的表达式为:

$$d\varepsilon_v^p = \frac{\lambda(s) - \kappa(s)}{1+e_0} \frac{dp}{p} \quad (4)$$

用塑性体应变 ε_v^p 作为硬化参数, 在 q - p 平面上, 根据等应力比三轴压缩试验确定的初始屈服应力(q_y, p_y), 及净围压 σ_3 小于等向压缩屈服应力时, 常规三轴剪切试验确定的剪切初始屈服应力(q_y, p_y), 得到 $\varepsilon_v^p=0$ 时, 不同吸力 s 下原状黄土的

初始屈服面如图4(a);对于一定的塑性体应变 ε_v^p ,不同 s 下典型的后继屈服面如图4(b);对于一定的 s ,随着应力的增大, ε_v^p 增大,不同 ε_v^p 下典型的后继屈服面扩展变化如图4(c)所示。把饱和土的 $K_{0w}(=1-\sin\varphi'=0.56)$ 线也绘在图4上。从图4可以看出:

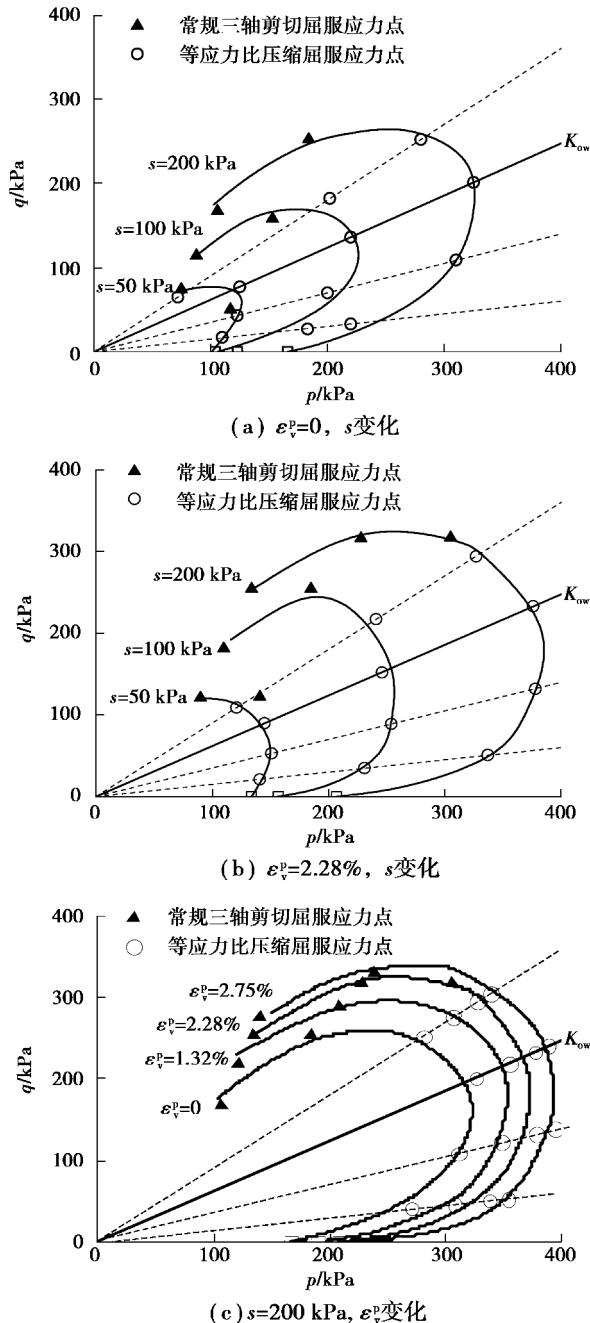


图4 不同应力路径三轴试验的屈服面

Fig. 4 Yield curves determined from triaxial tests under different stress paths

(1)非饱和原状黄土的初始及后继屈服面的形状皆为近似对称于饱和原状黄土 K_{0w} 线的倾斜

椭圆,其长轴的方向并非 p 轴,而是发生了偏转,与 p 轴斜交,说明原状黄土具有各向异性。对于同一屈服面,常规三轴剪切路径下试验点皆位于 K_0 线之上,等应力比三轴压缩下试验点视 K 与 K_0 的大小关系,分布在 K_0 线上下两侧。这与不同吸力压实粉土^[6]及饱和软黏土^[9]的屈服面形状相一致,反映出适用于各向同性土的BBM模型^[2]的屈服面不适用于原状黄土,同时验证了文献^[7]关于原状黄土在 K_0 线以下区域屈服点分布的推断。

(2)对于相同的塑性体应变 ε_v^p ,当吸力增大时,屈服面向外扩展,但未出现旋转硬化,表明吸力增大使屈服面产生等向硬化;吸力 s 相同时,随着塑性体应变 ε_v^p 的增大,屈服面扩展时也未出现旋转硬化,表明应力增大使屈服面产生等向扩大。这与不同吸力压实粉土^[6]的研究结果相一致。

4 结论

(1)等应力比三轴压缩及常规三轴剪切应力路径下, e - $\ln p$ 关系皆呈先平缓后陡变的下降趋势,且位于两条相交的直线上。

(2)吸力、应力比、净围压对回弹指数影响很小,对屈服应力及压缩指数的影响较大。等应力比三轴压缩路径下,应力比相同时,屈服应力及压缩指数随吸力增大而增大;吸力相同时,随应力比的增大而先增大后减小。常规三轴剪切应力路径下,净围压相同时,随吸力增大,屈服应力增大,压缩指数减小;吸力相同时,压缩指数和屈服应力皆随净围压的增大而增大。

(3)在 q - p 平面上,以塑性体应变作为硬化参数时,非饱和原状黄土的初始屈服及后继屈服面皆为对称于饱和土 K_0 线的倾斜椭圆,吸力及应力增大皆使屈服面产生等向扩大。

参考文献 (References)

- [1] Roscoe K H, Schofield A N, Wroth C P. On the yielding of soils[J]. Géotechnique, 1958, 8(1): 22-53.
- [2] Alonso E E, Gens A, Josa A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. Géotechnique, 1990, 40(3): 405-430.
- [3] Wheeler S J, Sivakumar V. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil[J]. Géotechnique, 1995, 45(1): 35-53.
- [4] Zakaria I, Wheeler S J, Anderson W F. Yielding of unsaturated compacted kaolin [A]//Proceeding of the First International Conference on Unsaturated Soils[C].

- Rotterdam; Balkema, 1995: 223-228.
- [5] Maatouk A, Leroueil S, Rochelle P. Yielding and Critical state of a collapsible unsaturated silty soil[J]. Géotechnique, 1995, 45(3): 465-477.
- [6] Cui Y J, Delage P. Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted [J]. Géotechnique, 1996, 46(2): 291-311.
- [7] 陈存礼, 张登飞, 董玉柱, 等. 常含水率三轴应力条件下非饱和原状黄土的吸力和力学特性[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1195-1202. (Chen Cunli, Zhang Dengfei, Dong Yuzhu, et al. Suction and mechanical behaviours of unsaturated intact loess from constant water content triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1195-1202. (in Chinese))
- [8] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 82-90. (Chen Zhenghan. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 82-90. (in Chinese))
- [9] 曾玲玲, 洪振舜, 刘松玉, 等. 应力路径对天然沉积土压缩特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1250-1255. (Zeng Lingling, Hong Zhenshun, Liu Songyu, et al. Experimental study on different compression behaviors of natural clays caused by various stress paths [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1250-1255. (in Chinese))
- [10] 张登飞, 陈存礼, 李文文, 等. Q3 原状非饱和黄土的水量变化和临界状态特性[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增1): 197-201. (Zhang Dengfei, Chen Cunli, Li Wenwen, et al. Characteristics of critical state and water volume for Q3 unsaturated intact loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(Supp.1): 197-201. (in Chinese))

(上接第 351 页)

- [13] 王恩元, 何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 131-137. (Wang Enyuan, He Xueqiu. Experimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(1): 131-137. (in Chinese))
- [14] 潘一山, 唐治, 李忠华, 等. 不同加载速率下煤岩单轴压缩电荷感应规律研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1043-1048. (Pan Yishan, Tang Zhi, Li Zhonghua, et al. Research on the charge inducing regularity of coal rock at different loading rate in uniaxial compression tests [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 1043-1048. (in Chinese))
- [15] 李忠辉, 娄全, 王恩元, 等. 顶板岩石受压破坏过程中声电热效应研究[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1098-1103. (Li Zhonghui, Lou Quan, Wang Enyuan, et al. Experimental study of acoustic-electric and thermal infrared characteristics of roof rock failure [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(6): 1098-1103. (in Chinese))
- [16] 曹安业, 井广成, 窦林名, 等. 不同加载速率下岩样损伤演化的声发射特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(6): 923-928, 935. (Cao Anye, Jing Guangcheng, Dou Linming, et al. Damage evolution law based on acoustic emission of sandy mudstone under different uniaxial loading rate [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(6): 923-928, 935. (in Chinese))
- [17] 陈宇龙, 魏作安, 许江, 等. 单轴压缩条件下岩石声发射特性的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(增2): 237-240. (Chen Yulong, Wei Zu'an, Xu Jiang, et al. Experimental research on the acoustic emission characteristics of rock under uniaxial compression [J]. Chinese Journal of China Coal Society, 2011, 36(Supp.2): 237-240. (in Chinese))
- [18] 李玉, 赵伏军, 王斌, 等. 刀具压入破岩声发射分形特征实验[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(1): 10-15. (Li Yu, Zhao Fujun, Wang Bin, et al. Experimental research on fractal characteristics of acoustic emission during cutter pressing in rock fragmentation [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 33(1): 10-15. (in Chinese))
- [19] 王恩元, 赵恩来. 岩土单轴压缩过程的电磁辐射特性实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(1): 56-58. (Wang Enyuan, Zhao Enlai. Experiment study on electro-magnetic emission character of rock and soil in process uniaxial compression loading, 2007, 26(1): 56-58. (in Chinese))