

DOI: 10.11779/CJGE201507019

非饱和原状黄土增湿条件下力学特性试验研究

高 帅¹, 骆亚生¹, 胡海军¹, 王鹏程¹, 张 帅², 刘建龙¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 内蒙古自治区水利科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 利用FSY30型应变控制式非饱和土三轴仪采用常含水率试验, 研究陕西泾阳县某边坡原状黄土在不同含水率(无偏应力条件下增湿)、不同固结围压下的强度和变形特性, 求得Fredlund双应力状态变量抗剪强度公式中 φ^b 值并利用含水率建立了工程中实用的抗剪强度公式; 再将天然原状土在不同偏应力水平下增湿饱和后继续剪切, 观察其力学特性。两种增湿条件下试验结果表明: 该地区黄土应力应变曲线关系呈剪切硬化型; 含水率与初始基质吸力呈双曲线关系, 剪切过程中基质吸力无明显变化, 抗剪强度指标黏聚力随着含水率的增大显著降低而内摩擦角所受影响较小; 有偏应力条件下试样浸水饱和后破坏强度显著降低, 但对应力应变关系影响较小, 增湿时偏应力水平越低, 土样饱和后的稳定偏应力值越小。

关键词: 非饱和原状黄土; 三轴浸水剪切; 抗剪强度; 基质吸力

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)07-1313-06

作者简介: 高 帅(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程理论与计算。E-mail: shuai_200808@163.com。

Triaxial tests on water immersion of unsaturated and undisturbed loess

GAO Shuai¹, LUO Ya-sheng¹, HU Hai-jun¹, WANG Peng-cheng¹, ZHANG Shuai², LIU Jian-long¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Inner Mongolia

Institute of Hydraulic Research, Inner Mongolia, Hohhot 010020, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of undisturbed loess slope under different circumstances in Jingyang county of Shaanxi Province, two humidification experiments are conducted. The constant water content tests are operated to observe the strength and deformation characteristics under different water contents (humidify with no stress conditions) and confining pressures by obtaining the value of φ^b in the shear strength formula of Fredlund's double stress state variables, and a practical shear strength formula for the water content is derived by using FSY30 type strain controlled triaxial apparatus for unsaturated soils. The other tests are the experiments under different confining pressures and partial stresses in which cuts of the undisturbed loess are operated twice before and after the flooding to saturation. The two experiments reveal: (1) The stress-strain curves of loess in this region takes a hardening type according to the data analysis from the two tests; (2) Based on the constant water content tests, the water content and initial matric suction are hyperbolically related, and the matric suction shows no significant changes in the process of shearing. And the increase of water content has larger influence on the decrease of cohesion of shear strength index than the impact on internal friction angle; (3) On the basis of the second experiment, the strength of specimens decreases significantly after flooding which has little effect on the stress-strain curves. The lower the partial stress when humidification takes place, the lower the stable partial stress values.

Key words: unsaturated and undisturbed loess; triaxial test on water immersion; shear strength; matric suction

0 引言

20世纪末非饱和土力学理论再一次活跃起来, 非饱和土由于收缩膜的存在使得其性质比饱和土复杂的多, 黄土又是一种典型的非饱和土, 把黄土力学研究作为非饱和土力学特殊的一枝, 互相借鉴, 彼此推动, 已经成了一个适应形势、顺理成章的大趋势^[1]。对于非饱和原状黄土三轴试验的研究已经有许多有价值的成果: 邢义川等^[2]利用组装的非饱和土三轴仪以陕西

武功黄土为研究对象, 初步分析了非饱和黄土破坏时水气演化规律; 方祥位等^[3]利用控制吸力三轴排水剪切试验研究了吸力对非饱和原状Q₂黄土性质的影响; 李永乐等^[4]对不同含水率条件下原状非饱和黄土的强度和土-水特征曲线进行了试验研究并提出了非饱和

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178392)

收稿日期: 2014-08-11

土抗剪强度模型。然而,针对非饱和黄土的三轴试验,学者们大都采用控制吸力不变的固结排水方法,实际工程中土体破坏存在两种形式:一种为常吸力的慢速破坏,另一种则是土体在临近破坏时由于时间短暂和渗透路径的限制,孔隙水来不及排出,常含水率下快速破坏。对于第二种快速破坏形式的研究,陈存礼等^[5]对不同初始吸力非饱和原状黄土进行了常含水率等向压缩和三轴剪切试验,研究了常含水率下非饱和原状黄土的变形特性,临界状态,屈服及吸力变化特性。

另一方面,黄土地区地下水位一般较深,因而黄土多处于非饱和状态,黄土的矿物组成及其微观结构的特殊性决定了黄土对水作用的敏感性。利用三轴浸水试验来模拟非饱和黄土地区随着降雨入渗或地下水位的升降影响工程建设前人做了大量研究^[6-7]。由于土的应力、应变过程具有强烈的非线性,不同应力水平下的土,其力学性质有显著的不同,预示着不同的发展趋势。土的增减湿作用通过改变土中的吸力、胶结力、胀缩力以及重力来实现应力而引起变形的效果,仍然可以导致土发生变形。增减湿的这种特性与应力的相应特性相耦合往往才能够反映具体条件下土变形的真实作用^[8]。所以,对不同偏应力水平下非饱和黄土的浸水增湿剪切试验研究具有重要的意义。笔者以陕西泾阳县某边坡黄土为试验材料,开展了原状非饱和黄土常含水率三轴试验和不同偏应力水平下三轴浸水增湿试验,着重分析了两种不同增湿条件下非饱和黄土的强度和变形特性,以期为边坡稳定分析提供非饱和强度参数。其二为考虑湿陷的黄土弹塑性本构模型提供基本数据,从而对黄土基本理论与实际工程提供有意义的结论。

1 研究方法

1.1 土样性质

试验土样取自陕西省泾阳县某边坡,取土深度为3~4 m,属Q₃黄土,天然含水率为17% (天然饱和度为40.8%),天然干密度为1.28 g/cm³,由标准击实试验得出其最大干密度为1.70 g/cm³,最优含水率为18.1%,按塑性图分类CL其它物理指标见表1。

表1 黄土的物理性质指标

Table 1 Indexes of physical properties of loess

G_s	w_L %	w_p %	I_p	颗粒组成/%		
				>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
2.74	32.7	16.5	16.2	0.88	69.86	29.26

1.2 试样制备

由于黄土质地比较均匀,干密度相差不大,故控

制所有试样干密度为1.28 g/cm³,此值为原状黄土的平均干密度。原状试样由土样在切土盘上削制成直径为3.91 cm、高为8 cm的圆柱体。采用水膜转移法控制试样初始含水率为17% (天然),20.8%,25%和29.1%四个等级,对应的饱和度分别为40.8%,50%,60%和70%,并在保湿缸中放置48 h以上,以便试样中水分扩散均匀。

1.3 试验方案

仪器采用FSY30型应变控制式非饱和土三轴仪,试验分为不同含水率试样(无偏应力条件下增湿)的常含水率试验和有偏应力条件下增湿试验。

常含水率试验在装样前控制好试样4种初始含水率,每种含水率对应4个试样,共计16个试样。净围压 σ_3-u_a 分别控制为100,200,300,400 kPa,孔隙气压力 u_a 依据试样含水率的增加而设为80,60,40,20 kPa四个等级。通过压力室底座已饱和的高进气值陶土板和对应的压力传感器全程测量孔隙水压力的变化。先将制备的非饱和原状黄土试样进行等压固结,待变形和排水稳定后进行不排水试验。稳定的标准是体积应在2 h内不超过0.01 cm³,并且排水量在2 h内不超过0.01 cm³,且历时不少于48 h。控制剪切速率为0.0096 mm/min,达到峰值强度时停止剪切,无峰值时采用轴向应变的15%为破坏标准。

有偏应力条件下浸水增湿试验采用常规三轴试验方法在天然含水率下进行,共计16个试样。剪切到4种不同偏应力水平 $\left[\frac{1}{3}(\sigma_1-\sigma_3)_f, \frac{1}{2}(\sigma_1-\sigma_3)_f, \frac{2}{3}(\sigma_1-\sigma_3)_f \text{ 和 } \frac{9}{10}(\sigma_1-\sigma_3)_f\right]$ 时停止剪切,然后通过改进的底座利用水头饱和法浸水使试样饱和。饱和后稳定标准为:体变在2 h内不超过0.0063 cm³,试样顶部出水连续并且2 h内浸水量等于出水量^[6]。饱和后待偏应力稳定不变后继续剪切直至破坏。同样控制围压 σ_3 为100,200,300,400 kPa四个等级。

2 试验结果分析

2.1 非饱和原状黄土的应力应变特性

根据试验数据绘制试样的初始含水率为天然湿度时在不同净围压下剪切的偏应力 $q=\sigma_1-\sigma_3$ 与轴向应变 ε_1 关系曲线如图1。

由图1可见,天然含水率下非饱和原状黄土试样呈塑形破坏,应力应变特性呈剪切硬化型,并且随着净围压的增加硬化程度升高,这是由于等向固结后非饱和原状黄土的结构性随着净围压的增加而减小。破坏强度同样随着净围压的增加而增加,这是由于围压的增大更有利于原状黄土试样的压密和次生结构的生

成, 从而导致强度的提升。

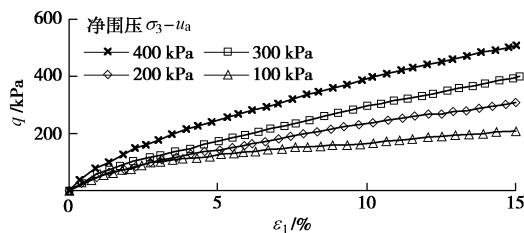


图 1 试样的初始含水率为天然湿度时在不同净围压下剪切的应力 - 应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of natural saturation under different confining pressures

2.2 含水率与初始基质吸力的关系

针对含水率 w (或饱和度 s_r) 与基质吸力 $s = u_a - u_w$ 的关系曲线即土 - 水特征曲线, 前人已经做了比较系统的研究, 并提出了一系列的经验模型公式^[9-10]。本次试验结果显示含水率与初始基质吸力的关系曲线为一凹曲线, 随着含水率的逐渐增大, 基质吸力愈来愈小, 曲线由陡变缓, 见图 2。考虑到实际工程中不同围压的影响, 试验结果表明: 在同一含水率情况下, 固结围压对试样固结后的初始基质吸力影响很小, 可以忽略不计, 见图 3。

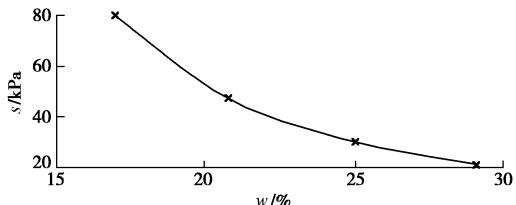


图 2 含水率与初始基质吸力关系曲线

Fig. 2 Relationship between water content and initial matrix suction

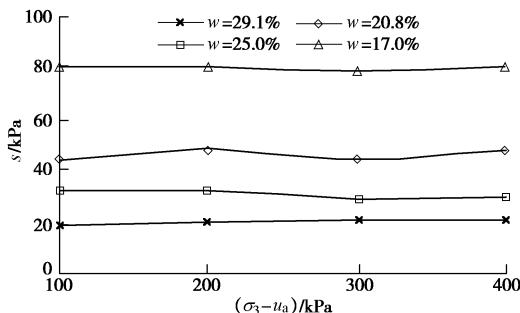


图 3 固结围压与初始基质吸力关系曲线

Fig. 3 Relationship between confining pressure and initial matrix suction

2.3 剪切过程中基质吸力的变化

根据试验数据, 绘制剪切过程中不同含水率下试样孔隙水压力 u_w 、基质吸力 s 与轴向应变 ε_1 的关系如图 4, 5 所示。

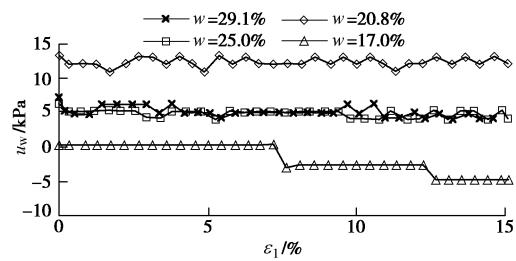


图 4 孔隙水压力与轴向应变关系曲线

Fig. 4 Relationship between neutral pressure and axial strain

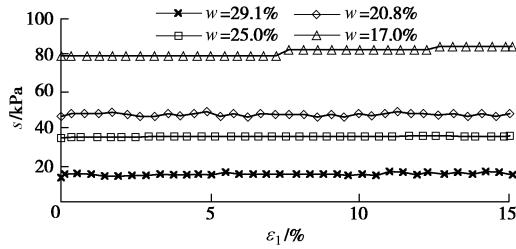


图 5 基质吸力与轴向应变关系曲线

Fig. 5 Relationship between matrix suction and axial strain

由图 4 可见, 不同含水率试样在整个剪切过程中孔隙水压力变化不大, 波动范围不超过 5 kPa, 在低含水率 (天然含水率 17%) 时, 孔隙水压力在剪切过程中有下降的趋势。由图 5 可见, 不同含水率的试样在整个剪切过程中基质吸力无明显变化, 在 17% 含水率时基质吸力略有增加。

土体中基质吸力的大小与其颗粒之间水膜凹曲面的曲率有关, 曲率越大, 吸力越大。通过对土体微观机理的分析, 笔者认为出现上述现象的原因: 土体在受外荷作用时产生两种趋势, 一种是随着土体体积的缩小, 颗粒间水膜伸缩的空间受到限制, 水膜变厚, 影响水膜凹曲面曲率变小, 从而使吸力减小; 另一种趋势是随着土体体积的减小, 土体中的孔隙变小, 使得孔隙周围水膜凹曲面的曲率变大, 从而使吸力增大。含水率低时, 水膜厚度的变化有限, 孔隙变小引起水膜曲率变大为主导因素, 从而引起吸力的增长。因此, 在上述黄土试样的剪切过程中, 这两种趋势共同作用决定了吸力随轴向应变的变化情况。

2.4 抗剪强度特性

强度参数可由 $p - q$ 平面的包络线^[11]求得, 含水率相同的一组数据点落在同一直线上, 如图 6 所示。

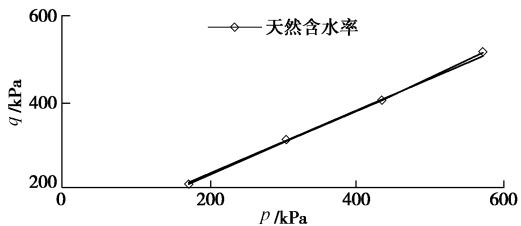


图 6 $p - q$ 平面上的强度包线

Fig. 6 Strength envelopes in $p - q$ plane

土的抗剪强度公式为

$$q_f = \xi + p_f \tan \omega \quad , \quad (1)$$

式中, $q_f = (\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 和 $p_f = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)_f - u_a$ 分别表示破坏偏应力和破坏净平均正应力。 ξ 和 $\tan \omega$ 分别表示直线的截距和斜率, 通过最小二乘法确定。内摩擦角 φ 值由下式求得:

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

总黏聚力 c 值则由下式求得:

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

由式(2)、(3)可得出土的抗剪强度参数 c 和 φ , 详见表 2。

表 2 抗剪强度参数

Table 2 Parameters of shear strength

u_a /kPa	$(\sigma_3 - u_a)$ /kPa	q_f /kPa	p_f /kPa	ξ /kPa	$\tan \omega$	c /kPa	φ (°)
20	100	153.15	151.05	34.46	0.83	16.25	21.37
20	200	290.90	296.97	34.46	0.83	16.25	21.37
20	300	392.00	430.67	34.46	0.83	16.25	21.37
20	400	501.20	567.07	34.46	0.83	16.25	21.37
40	100	184.00	161.33	48.99	0.81	23.10	20.92
40	200	276.10	292.03	48.99	0.81	23.10	20.92
40	300	410.25	436.75	48.99	0.81	23.10	20.92
40	400	508.95	569.65	48.99	0.81	23.10	20.92
60	100	204.20	168.07	65.46	0.78	30.86	20.18
60	200	282.85	294.28	65.46	0.78	30.86	20.18
60	300	408.30	436.10	65.46	0.78	30.86	20.18
60	400	512.50	570.83	65.46	0.78	30.86	20.18
80	100	212.50	170.83	83.71	0.75	39.46	19.41
80	200	311.35	303.78	83.71	0.75	39.46	19.41
80	300	404.20	434.73	83.71	0.75	39.46	19.41
80	400	513.33	571.11	83.71	0.75	39.46	19.41

注: u_a 为孔隙气压力, $\sigma_3 - u_a$ 为净围压, q_f 为破坏时偏应力。

由表 2 和图 2 可以看出, 总黏聚力 c 值随着含水率的增大而逐步减小, 即随着初始吸力值的增大而增大; 而内摩擦角 φ 值是随着吸力的增大而减小, 但是效果并不明显, 在含水率 17%~29.1% 区间, 内摩擦角只变化了 2°, 故可认为 φ 为一常数并与基质吸力无关^[12], 且等于饱和土的内摩擦角 φ' 。黏聚力 c 与基质吸力 s 的关系如图 7 所示。

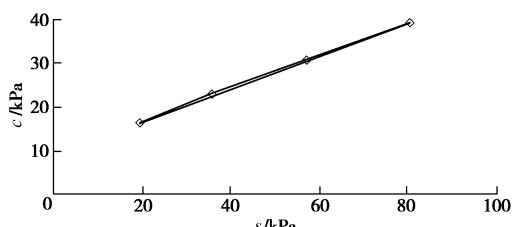


图 7 $c - s$ 关系曲线

Fig. 7 Relationship between c and s

由图 7 可以看出, 在本次试验所测得的吸力范围

内, 黏聚力 c 值的增加与吸力值增加成线性正比关系, 采用 Fredlund 等^[13]提出的非饱和土双应力状态变量抗剪强度公式:

$$\tau_f = c' + (u_a - u_w)_f \tan \varphi^b + (\sigma - u_a)_f \tan \varphi' \quad , \quad (4)$$

式中, c' 表示土的有效黏聚力; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; φ^b 为对应基质吸力的内摩擦角, 反映了抗剪强度增长率与基质吸力的关系。由此可得本次试验用土的强度参数: $c' = 8.89$ kPa, $\varphi' = 23.45^\circ$, $\varphi^b = 21^\circ$ 。破坏时的基质吸力 $(u_a - u_w)_f$ 可由图 5 得到。

2.5 抗剪强度与含水率的关系

不同含水率下的非饱和黄土抗剪强度如图 8 所示。

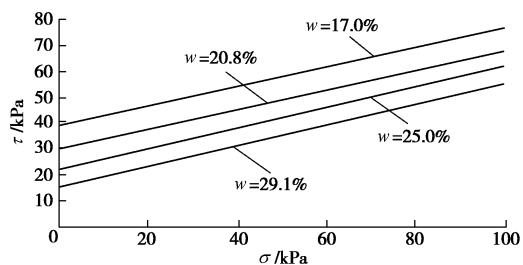


图 8 不同含水率的强度曲线

Fig. 8 Strength curves with different water contents

从图 8 可以看出, 试样的抗剪强度随着含水率的增大而减小。将式(4)改写成类似于莫尔-库仑强度公式:

$$\tau_f = c_{\text{total}}(w) + \sigma_f \tan \varphi_{\text{total}}(w) \quad . \quad (5)$$

此时 c_{total} 和 φ_{total} 不再是常数, 它们表示非饱和黄土的基质吸力和结构性等因素对强度的贡献, 随含水率(或饱和度)的变化而变化。由本次试验数据得到的 c_{total} 值、 φ_{total} 值与含水率 w 的关系曲线如图 9、10 所示。

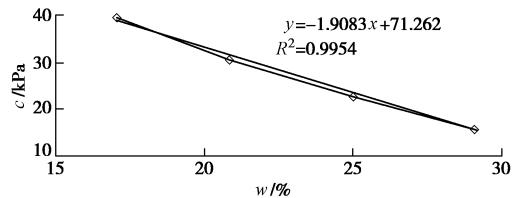


图 9 $c_{\text{total}} - w$ 关系曲线

Fig. 9 Relationship between c_{total} and w

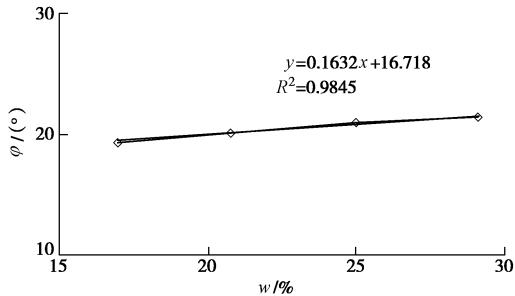


图 10 $\varphi_{\text{total}} - w$ 关系曲线

Fig. 10 Relationship between φ_{total} and w

从图9, 10可以看出本次试验中 c_{total} , φ_{total} 和 w 呈典型的线性关系, 通过最小二乘法得到

$$\left. \begin{aligned} c_{\text{total}} &= -1.9083w + 71.262, \\ \varphi_{\text{total}} &= 0.1632w + 16.718. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

把式(6)代入式(5)得到以含水率为唯一变量的抗剪强度公式:

$$\tau_f = 71.262 - 1.9083w + \sigma_f \tan(16.718 + 0.1632w). \quad (7)$$

式中 σ_f 为剪切破坏面上的正应力(kPa); w 为含水率(%)。此抗剪强度公式虽然很好的利用了含水率这一变量确定出非饱和黄土的抗剪强度, 对于一些精度要求不高的实际工程而言具有一定的实用价值, 但只是用于中低饱和度(天然饱和度至70%), 对于高饱和度的土体并不能说明问题。

2.6 浸水增湿试验应力应变关系

实际工程中随着降雨的入渗、地下水位的升降导致土体含水率或饱和度的增加, 其强度、稳定性逐渐降低, 甚至滑动形成滑坡, 从而为黄土地区的工程建设带来了巨大的隐患。本次试验在第一到第四偏应力水平 $\left[\frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)_f, \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)_f, \frac{2}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)_f, \frac{9}{10}(\sigma_1 - \sigma_3)_f \right]$ 下浸水, 由试验数据得到不同固结围压后、不同偏应力水平下三轴浸水增湿应力应变关系曲线如图11~14所示。

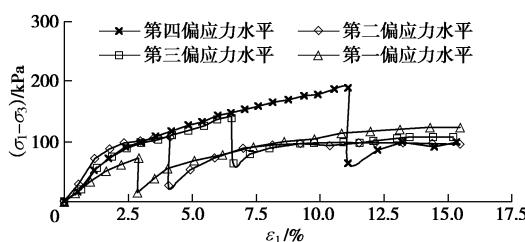


图 11 100 kPa 围压下应力 – 应变关系曲线

Fig. 11 Stress-strain curves under confining pressure of 100 kPa

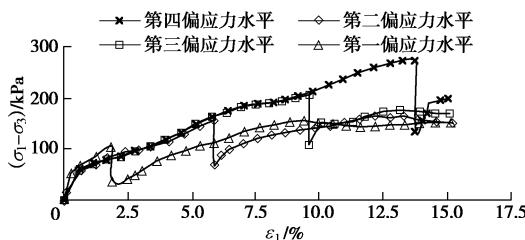


图 12 200 kPa 围压下应力 – 应变关系曲线

Fig. 12 Stress-strain curves under confining pressure of 200 kPa

由图11~14可以看出, 浸水前剪切阶段, 不同围压下试样应力应变关系都呈剪切硬化型, 随着围压的增加硬化程度提高, 并呈塑形破坏趋势。除300 kPa围压下第四偏应力水平试样外, 浸水前每一围压下试样的应力应变关系曲线吻合程度较高, 可以体现试样

的均匀性较好。

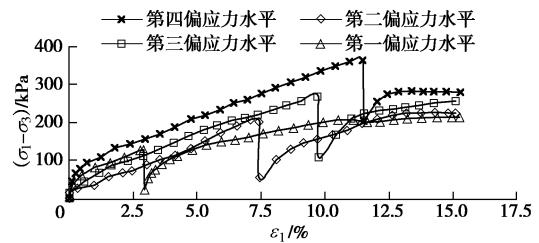


图 13 300 kPa 围压下应力 – 应变关系曲线

Fig. 13 Stress-strain curves under confining pressure of 300 kPa

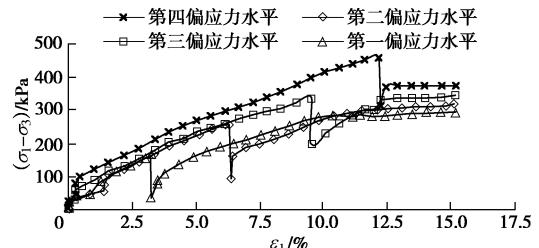


图 14 400 kPa 围压下应力 – 应变关系曲线

Fig. 14 Stress-strain curves under confining pressure of 400 kPa

浸水阶段试样的偏应力急剧下降, 浸水时偏应力水平越低, 浸水饱和后的稳定偏应力值越小。偏应力的降低是由于浸水饱和后原状试样的土体内自由水增多, 土粒接触点之间的水膜增厚, 润滑作用明显, 土粒间的静电吸力作用相对减小, 胶结作用减弱, 基质吸力作用减小, 导致结构强度变小。

浸水饱和后继续剪切时, 试样应力应变关系曲线依然为剪切硬化型, 浸水过程并未影响试样应力应变关系曲线形状; 同一围压下不同偏应力水平的试样最终到达同一强度范围, 可以认为是饱和土的强度范围; 随着围压的增大, 试样到达15%应变的强度值也逐步增加。应当指出, 由于在增湿过程中会有一定量的困陷气泡产生, 则增湿过程中的土体不会达到完全饱和。

3 结 论

本文采用FSY30型应变控制式非饱和土三轴仪对原状黄土进行了常含水率和浸水增湿试验, 着重研究了试样在无偏应力条件下增湿和有偏应力条件下增湿的强度和变形特性。结果表明:

(1) 两种条件下增湿试样都呈塑形破坏, 应力应变特性呈剪切硬化型, 并且随着净围压的增加硬化程度升高, 破坏强度同样随着净围压的增加而增加。

(2) 无偏应力条件下增湿试样含水率与初始基质吸力的关系曲线为一凹曲线, 随着含水率(或饱和度)的逐渐增大, 基质吸力愈来愈小, 曲线由陡变缓; 整个剪切过程中基质吸力的大小无明显变化; 在同一含水率情况下, 固结围压对试样固结后的初始基质吸力影响可以忽略不计; 抗剪强度指标黏聚力 c 值随着含水

率的增大而逐步减小，即随着初始吸力值的增大而增大；内摩擦角 φ 值受基质吸力影响效果并不明显。本次试验用土强度参数： $c'=8.89 \text{ kPa}$, $\varphi'=23.45^\circ$, $\varphi^b=21^\circ$ ，建立了工程中实用的抗剪强度公式： $\tau_f = 71.262 - 1.9083w + \sigma_f \tan(16.718 + 0.1632w)$ 。应当指出，由于本次试验土样统计数量有限，本文所得公式仅对该地区适用。

(3) 有偏应力条件下浸水时偏应力急剧下降；浸水时偏应力水平越低，试样浸水饱和后的稳定偏应力值越小；试样浸水饱和后继续剪切，不同偏应力水平的试样最终到达同一强度范围，试样到达15%应变时的强度值随着围压的增大而增大。

参考文献：

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 3 - 13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 3 - 13. (in Chinese))
- [2] 邢义川, 吴培安, 骆亚生. 非饱和原状黄土三轴试验方法研究[J]. 水利学报, 1996(1): 47 - 52. (XING Yi-chuan, WU Pei-an, LUO Ya-sheng. Triaxial test on undisturbed unsaturated loess[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(1): 47 - 52. (in Chinese))
- [3] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 原状 Q₂ 黄土三轴剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 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))
- [4] 李永乐, 张红芬, 余小光, 等. 原状非饱和黄土的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(10): 2859 - 2863. (LI Yong-le, ZHANG Hong-fen, SHE Xiao-guang, et al. Experimental study of triaxial test of undisturbed unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(10): 2859 - 2863. (in Chinese))
- [5] 陈存礼, 张登飞, 董玉柱, 等. 常含水率三轴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, 2013, **35**: 1 - 8. (CHEN Cun-li, ZHANG Deng-fei, DONG Yu-zhu, et al. Suction and mechanical behavior of unsaturated intact loess from constant water content triaxial tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**: 1 - 8. (in Chinese))
- [6] 李加贵, 陈正汉, 黄雪峰. 原状 Q₃ 黄土湿陷特性的 CT-三轴试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(6): 1288 - 1296. (LI Jia-gui, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng. CT-triaxial test for collapse ability of undisturbed Q₃ loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(6): 1288 - 1296. (in Chinese))
- [7] 张苏民, 郑建国. 湿陷性黄土(Q₃)的增湿变形特征[J]. 岩土工程学报, 1990, **12**(4): 21 - 31. (ZHANG Su-min, ZHENG Jian-guo. The deformation characteristics of collapsible loess during moistening process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **12**(4): 21 - 31. (in Chinese))
- [8] 谢定义. 高等土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (XIE Ding-yi. Advanced soil mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))
- [9] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(3): 53 - 56. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng. Experimental studies of laws of fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(3): 53 - 56. (in Chinese))
- [10] 缪林昌, 殷宗泽, 刘松玉. 非饱和膨胀土强度特性的常规三轴试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2000, **30**(1): 121 - 125. (MIAO Lin-chang, YIN Zong-ze, LIU Song-yu. Research on strength characteristics of unsaturated expansive soils based on general triaxial test[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2000, **30**(1): 121 - 125. (in Chinese))
- [11] 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 Zheng-han. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 82 - 90. (in Chinese))
- [12] LU N, WILLIAM J L. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 4 - 328. (LU N, WILLIAM J L. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 4 - 328. (in Chinese))
- [13] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soil[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1993.