

文章编号:1000-582X(2004)09-0124-05

重塑非饱和黄土等 p 剪切试验*

方祥位,陈正汉,申春妮

(后勤工程学院 军事土木工程系,重庆 400041)

摘要:探讨了重塑非饱和黄土等 p 剪切试验过程的破坏特性、屈服特性和水量变化特性。做了2种不同干密度的净平均应力和吸力等于常数、偏应力增大的三轴排水剪切试验。结果表明:破坏应力随吸力增大而增大;得到了一种确定等净平均应力剪切条件下屈服应力的新方法, $q-s$ 平面上的加载湿陷屈服线形状与 $p-s$ 平面相似;土-水特征曲线依赖于偏应力,建立了含水量-吸力-净平均应力-偏应力形式的土-水特征曲线。

关键词:非饱和土;剪切;偏应力;屈服;土-水特征曲线

中图分类号:TU 443

文献标识码:A

饱和土的强度、屈服和水量变化是非饱和土本构关系的重要内容^[1]。近年来提出了一些非饱和土的弹塑性本构模型,并借助于侧限压缩试验、直剪试验和各种应力路径的三轴试验进行了验证。试验结果表明应力路径对非饱和土的本构关系有较大影响^[2],而非饱和土的等 p 三轴排水剪切试验迄今未见研究报道。笔者拟对等 p 三轴排水剪切试验过程中土的强度特性、屈服特性和水量变化特性进行探讨。

1 研究方法

1.1 符号

描述非饱和土的应力状态一般需要3个应力张量,在不计土粒压缩性影响时则可采用2个应力状态变量^[3]。即,净总应力张量 $(\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij})$ 和吸力张量 $(u_a - u_w) \delta_{ij}$ 。其中 σ_{ij} 、 u_a 和 u_w 分别是总应力张量、孔隙气压力和孔隙水压力, δ_{ij} 是kronecker记号。为叙述方便,笔者采用以下符号描述三轴应力状态:

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} - u_a \quad (1)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2)$$

$$s = u_a - u_w \quad (3)$$

式中, p, q, s 分别称为净平均应力、偏应力和吸力; σ_1 和 σ_3 分别是大、小主应力。用 ϵ_v 和 ϵ_w 分别表示土样的

体应变和土中水相体变,它们由以下2式定义:

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (4)$$

$$\epsilon_w = \frac{\Delta V_w}{V_0} \quad (5)$$

式中, $\Delta V, \Delta V_w$ 和 V_0 分别表示土样的体积改变量、水相体积改变量和土样的初始体积; ϵ_v 和 ϵ_w 分别通过以下式与土的比容 $v(v = 1 + e, e$ 是孔隙比)和含水量 w 相联系,即

$$v = (1 + e_0)(1 - \epsilon_v) = v_0(1 - \epsilon_v) \quad (6)$$

$$w = w_0 - \frac{1 + e_0}{d_s} \epsilon_w \quad (7)$$

式中, e_0, w_0 和 d_s 分别是土样的初始孔隙比、初始含水量和土粒相对密度。

1.2 试验设备与土样

试验设备采用改装的三轴仪,其构造已在文献[2,4]中作了详细介绍。为达到研究目标,三轴剪切改用应力控制。采用气动加荷器加载,用荷载传感器和数据采集系统监测并控制轴向压力。这样,在试验过程中,总室压力 σ_3 每减小一级,就可以通过此时试样的面积反算需施加的轴力,从而控制净平均应力 p 等于常数。

试验用土采用青海桥头电厂五期探井中的黄土,

* 收稿日期:2004-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10372115)

作者简介:方祥位(1975-),男,重庆铜梁人,后勤工程学院教师,在职博士生,主要从事岩土工程的研究。

重塑制样。根据设计的试样干密度算出一个土样所需的湿土,再分成 5 等份。用专门的加载设备把土料在试样模中分 5 层压实,每层高度用套在试样模活塞上的钢环控制。试样的直径和高度分别是 $3.91 \times 10^{-2} \text{ m}$ 和 $8 \times 10^{-2} \text{ m}$;土样的初始条件见表 1。

表 1 试样的初始条件

干密度 $\rho_d/10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	相对密度 d_r	含水量 $w_0/\%$	孔隙比 e_0	饱和度 $S_r/\%$
1.50	2.72	16	0.81	53.7
1.68	2.72	16	0.62	70.2

1.3 试验方法

为了研究等 p 三轴排水剪切过程中土的破坏特性、屈服特性和水量变化特性,做了 2 组共 6 个三轴排水剪切试验。试样的干密度分别控制为 $1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 和 $1.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。在试验中,净平均应力和吸力等于常数,偏应力增大。控制净平均应力等于 150 kPa,吸力分别为 75 kPa,100 kPa 和 200 kPa,偏应力分级施加至试样破坏。在排水剪切试验中,孔隙水压力 u_w 等于零,因而试验时只需控制孔隙气压力 u_a 为常数,调整总室压力 σ_3 和轴向力(相当于 $\sigma_1 - \sigma_3$) 以控制净平均应力 p 等于常数即可。这种非饱和土试验尚未见有关研究报道。

1.4 加荷速率控制

由于非饱和土的渗透性很小,为了取得试样在各级荷载下变形与排水量的稳定值,每加一级荷载(即调整一次总室压力 σ_3 和轴向力)的时间间隔必须足够长。采用的稳定标准为:在 2 h 内,试样的体变和排水量分别小于 $0.0063 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 和 $0.012 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 。每加一级荷载约需(2 ~ 3)d,完成一个试验约需半个月左右。

2 试验结果分析

2.1 破坏特性

控制净平均应力和吸力等于常数的三轴排水剪切试验,随着偏应力的增加净室压力($\sigma_3 - u_a$) 将减小,加速了土样的破坏,所以土样破坏时的轴向应变(ε_a) 均较小。笔者所做 6 个试验在破坏时的轴向应变均不超过 4%(相对于固结完成后的试样高度),破坏型式均为脆性破坏。对于脆性破坏,取 $q - \varepsilon_a$ 曲线上的峰值点对应的应力为破坏应力。6 个三轴排水剪切试验的破坏应力列于表 2 中, $s - q_f$ 关系示于图 1。

从图 1 可以看出,相同吸力下干密度越大破坏应力越大,干密度相同的一组试验点破坏应力随着吸力

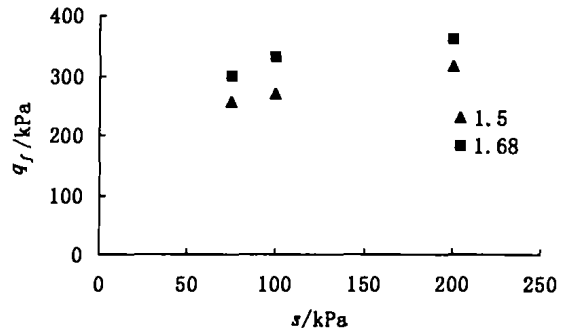


图 1 $s - q$ 平面内的强度包线

增大而增大,表明等 p 剪切试验的破坏应力随吸力增大而增大。

2.2 屈服特性

非饱和土的屈服特性是近年来的研究热点。首先需要判断非饱和土在等 p 剪切过程中是否屈服,也就是确定屈服应力。文献[2,5] 给出了不同的确定屈服应力的方法,都是针对具体的试验过程而提出的方法,对于本文的等 p 剪切试验不适用。考虑到剪切过程中净平均应力和吸力都等于常数,土的屈服主要依赖于偏应力 q 。本文建议利用 $v - q$ 关系曲线确定屈服点。土样 $\rho_d = 1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的 3 个剪切试验的 $v - q$ 关系示于图 2 中。

表 2 破坏应力

干密度 / $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	s/kPa	q_f/kPa
1.50	75	255
	100	270
	200	315
1.68	75	300
	100	330
	200	360

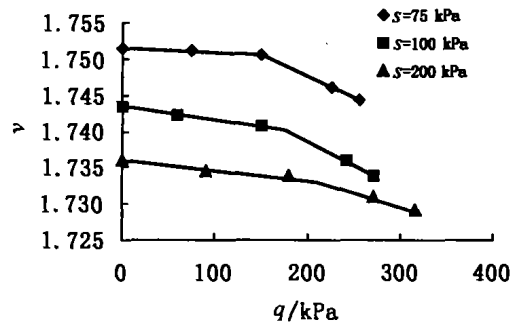


图 2 $v - q$ 曲线

从图 2 中可以看出,等 p 剪切试验的 $v - q$ 曲线的首尾部分可用直线近似,两直线的交点可作为屈服点。这是因为土样屈服时,结构发生破坏,体变幅度增大。屈服点的应力值列于表 3 中。

表3 屈服点对应的应力值

干密度 / $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	s/kPa	q/kPa
1.50	75	150
	100	170
	200	210
1.68	75	230
	100	250
	200	270

在已提出的非饱和土弹塑性本构模型中,最流行的是 Alonso 提出的本构模型^[6]。该模型认为在 $p-s$ 平面上有 2 条屈服线,即加载湿陷屈服线(LC)和吸力增加屈服线(SI)。其中 LC 屈服线是指增大荷载或减小吸力使土屈服,为一曲线;SI 屈服线是指增加吸力使土屈服,假设为一直线;2 条屈服线所包围的区域是弹性区,当应力路径超越这 2 条屈服线时土将发生屈服。针对这 2 条屈服线,一些学者进行了研究并做了改进。笔者所做试验净平均应力和吸力等于常数,偏应力增加,可看作是加载湿陷屈服。与 $p-s$ 平面类似,将上面得到的屈服点描绘在 $q-s$ 平面上,得到 $q-s$ 平面上的加载湿陷屈服线 $L'C'$ (图 3)。可以发现, $q-s$ 平面上的

加载湿陷屈服线 $L'C'$ 与 $p-s$ 平面上的加载湿陷屈服线 LC 形状非常相似。由于所做工作的限制,屈服包线的形式有待进一步研究。

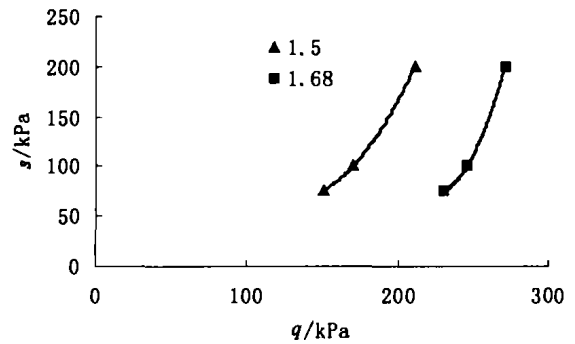


图3 屈服点在 $q-s$ 平面上的分布

2.3 剪切过程水量变化分析

考虑到试验历时较长及排水量测系统的误差,应对排水量测值进行校正。由试样的初始含水量和最终含水量之差,可以算出试样的实际排水量,并据此把试验过程中所量测的排水量按历时校正。表 4 给出了试验结果,表明排水量的量测值与校正值之间的差别不大。尽管如此,在以下的分析中排水量采用校正值。

表4 试样排水量校正

ρ_d / $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	s / kPa	量测值 / 10^{-6} m^3			校正值 / 10^{-6} m^3			总量差值 / 10^{-6} m^3	总量相对 误差 / %
		总量	固结	剪切	总量	固结	剪切		
1.50	75	4.32	3.04	1.28	4.26	3.00	1.26	0.06	1.41
	100	5.01	3.70	1.31	5.18	3.83	1.35	0.17	3.28
	200	7.40	5.96	1.44	7.55	6.08	1.47	0.15	1.99
1.68	75	4.18	3.08	1.10	4.29	3.16	1.13	0.11	2.56
	100	5.14	3.96	1.18	5.34	4.11	1.23	0.2	3.75
	200	7.50	6.15	1.35	7.61	6.24	1.37	0.11	1.45

图 4 给出了净平均应力 p 和吸力 s 等于常数的三轴排水剪切试验结果。由该图可见,试样中的含水量在剪切过程中是变化的,其 $w-q$ 关系可用一直线近似,不同吸力下的直线斜率用 $\alpha(s)$ 表示。对于同一土样,在不同吸力作用下, $\alpha(s)$ 几乎相同,可取其平均值表示。对于 $\rho_d = 1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的土样 $\alpha(s)$ 的平均值为 $-3.07 \times 10^{-5} (\text{kPa})^{-1}$,对于 $\rho_d = 1.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的土样 $\alpha(s)$ 的平均值为 $-2.09 \times 10^{-5} (\text{kPa})^{-1}$ 。 $\rho_d = 1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的土样在剪切过程中含水量随偏应力 q 变化的幅度比 $\rho_d = 1.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的土样大,说明剪切过程中干密度对含水量的变化有影响,这是由于干密度小的土样在偏应力作用下其结构易于改变破坏的缘故。

水量变化的增量形式可表示为:

$$d\varepsilon_w = \frac{dp}{K_{wpt}} + \frac{ds}{H_{wt}} + \frac{dq}{K_{wqt}} \quad (8)$$

式中的下标 t 表示切线的意义, K_{wpt} 、 H_{wt} 和 K_{wqt} 分别表示与净平均应力、吸力和偏应力相关的水的切线体积模量。 K_{wpt} 的 H_{wt} 确定方法在文献[7]中已经给出, K_{wpt} 经试验测定为常数; $H_{wt} = \ln 10 \frac{s + p_{\sigma}}{\lambda_w(p)}$, 其中 $\lambda_w(p)$ 为常数。

下面介绍与偏应力相关的水的切线体积模量 K_{wqt} 的确定方法。把式(7)对 q 求导可得:

$$\frac{dw}{dq} = - \frac{1 + e_0}{ds} \frac{d\varepsilon_w}{dq} \quad (9)$$

式(9)反映了在剪切过程中含水量与土中水量改变的

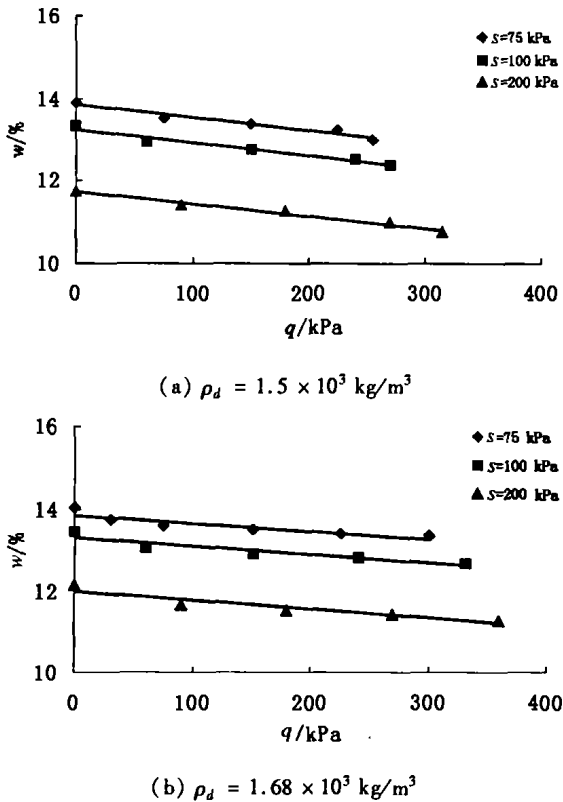


图4 等 p 剪切过程的 $w - q$ 曲线

关系,右边的负号表示含水量随着排水而降低,随吸水而增加。将 $\frac{dw}{dq} = \alpha(s), K_{wqt} = \frac{dq}{d\varepsilon_w}$ 代入可得:

$$K_{wqt} = -\frac{1 + e_0}{d_s \alpha(s)} \quad (10)$$

把 e_0, d_s 和 $\alpha(s)$ 的值代入式(10)可得 K_{wqt} 的值。对于 $\rho_d = 1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的土样, $K_{wqt} = 21.7 \text{ MPa}$; 对于 $\rho_d = 1.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的土样, $K_{wqt} = 28.5 \text{ MPa}$ 。可见, K_{wqt} 与土样干密度有关。

把 K_{wqt} 及文献[7]中确定的 K_{wpt} 和 H_w 代入式(8),若土样在剪切过程中连续排水或连续吸水,则可同时对两边积分得:

$$\varepsilon_w = \frac{p}{K_{wpt}} + \frac{\lambda_w(p)}{\ln 10} \ln\left(\frac{s + p_{at}}{p_{at}}\right) + \frac{q}{K_{wqt}} \quad (11)$$

把式(11)代入式(7),得:

$$w = w_0 - \frac{1 + e_0}{d_s} \left[\frac{p}{K_{wpt}} + \frac{\lambda_w(p)}{\ln 10} \ln\left(\frac{s + p_{at}}{p_{at}}\right) + \frac{q}{K_{wqt}} \right] \quad (12)$$

式(12)即为四变量形式的土 - 水特征曲线的公式,其一般形式可写为:

$$w = w_0 - ap - b \ln\left(\frac{s + p_{at}}{p_{at}}\right) - cq \quad (13)$$

式中, $a = \frac{1 + e_0}{d_s K_{wpt}}, b = \frac{(1 + e_0) \lambda_w(p)}{d_s \ln 10}, c = \frac{1 + e_0}{d_s K_{wqt}}$; a, b, c 均为常数; p_{at} 为大气压。根据式(13),对剪切过程中的排水量数据进行拟合,可得 c 的值。对于 $\rho_d = 1.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的土样 $c = 0.307 \times 10^{-4} (\text{kPa})^{-1}$; 对于 $\rho_d = 1.68 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的土样, $c = 0.209 \times 10^{-4} (\text{kPa})^{-1}$ 。实际上,式(13)有一个隐含的条件即 $s \geq s_0$ (s_0 为土样的初始吸力),因为只有满足这样的条件非饱和土才会排水。

应当指出,文中的土样是剪缩的,对于先剪缩后剪胀或先剪胀后剪缩的土样,对式(8)应作分段积分才能得出描述不同阶段的土 - 水特征曲线。

3 结 论

- 1) 破坏应力随吸力增大而增大。
- 2) 建议利用 $v - q$ 关系曲线确定等净平均应力剪切条件下的屈服应力, $q - s$ 平面上的加载湿陷屈服线形状与 $p - s$ 平面相似。
- 3) 固结完成后的等净平均应力、等吸力剪切过程中,土 - 水特征曲线依赖于偏应力。提出了 $w - p - s - q$ 四变量形式的土 - 水特征曲线,能同时反映净平均应力、吸力及偏应力对水量变化的影响,可看作是非饱和土中水量变化本构关系的合理推广。

参考文献:

- [1] 陈正汉,周海清,孙树国,等. 非饱和土与特殊土的理论与实践探索二十年[A]. 岩土力学与工程进展[C]. 重庆:重庆出版社,2003.
- [2] 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):81-90.
- [3] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Unsaturated Soil Mechanics[M]. 陈仲颐,张在明译. 北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [4] 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):9-20.
- [5] 黄海,陈正汉,李刚. 非饱和土在平面上的屈服轨迹及土 - 水特征曲线的探讨[J]. 岩土力学,2000,21(4):316-321.
- [6] ALONSO E E, GENS A, JOSA. A constitutive model for partially saturated soil[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 405-430.
- [7] 陈正汉,周海清,FREDLUND D G. 非饱和土的非线性模型及其应用[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):603-608.

Tests with Controlled Net Mean Stress Equaling Constant of an Remolded Unsaturated Loess

FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni

(Department of Military Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China)

Abstract: The disruption, yield and water content change of a remolded unsaturated loess is studied during the course of shear tests with controlled net mean stress equaling constant. Two types of density's triaxial drained shear tests with controlled net mean stress and suction equaling constants are conducted. The test results show that the disruption stress increases with suction. A new method to identify the field stress under triaxial drained shear tests with controlled net mean stress equaling constants is suggested, and the shape of loading-collapse yield curve are similar in $q-s$ plane and in $p-s$ plane. The soil-water characteristic curve is dependent on deviatoric stress, and the soil-water characteristic curve including water content, suction, net mean stress and deviatoric stress is proposed.

Key words: unsaturated soil; shear; deviatoric stress; yield; soil-water characteristic curve

(编辑 姚 飞)

~~~~~  
(上接第 118 页)

## Jet with Diamond Port and Interaction Shock Structure in a Supersonic Flow

FAN Huai-guo

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The sonic air injection through diamond shaped orifices at different incidence angles (10, 27.5, 45 and 90°) and total pressures (0.10 and 0.46 MPa) in a Mach 5.0 freestream is studied experimentally. A 90° circular injector, with the same exit port area and total pressures, is examined for comparison. The objective of the present study was to obtain the jet flow and shock structure using shadowgraph photography, Mie-scattering flow visualization. The results indicate that the interaction shock wave retained attaches at smaller incidence angle and lower injection pressure. The detached shock creates lambda shock, and lambda shocks are presented at higher incidence angle cases and circular injector. The height of the jet outer edge increases during the jet turning into the main flow, and is larger at larger jet incidence angles. The jet plume narrows due to the plume spreading more in the lateral direction, and is absent for the circular injector. The entrainment size is observed to increase with increasing incidence angle. The penetration increases at larger incidence angles and higher jet momentum ratios. The penetration for the circular injectors exceed that of the 90° diamond injectors in the near field. The downstream penetration for the 90° diamond injectors exceeds that of the circular injectors.

**Key words:** diamond injector; jet in cross flow; interaction shock wave; vortices; mixing

(编辑 陈移峰)