

# 原状 Q<sub>2</sub> 黄土三轴剪切特性

方祥位<sup>1</sup>, 陈正汉<sup>1</sup>, 申春妮<sup>1</sup>, 王和文<sup>1</sup>, 刘厚健<sup>2</sup>

(1. 后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 400041; 2. 西北电力设计院, 西安 陕西 710032)

**摘要:** 探讨陕西蒲城电厂原状 Q<sub>2</sub> 黄土的变形、强度和屈服特性, 并研究吸力对非饱和原状 Q<sub>2</sub> 黄土性质的影响。共进行 2 种 12 个原状 Q<sub>2</sub> 黄土试样的三轴剪切试验, 即控制吸力和净围压为常数的非饱和土三轴排水剪切试验与控制初始含水量和围压为常数的三轴剪切试验。研究表明, 非饱和原状 Q<sub>2</sub> 黄土控制吸力为 100, 300, 450 kPa 的试验试样呈塑性破坏, 而控制初始含水量为 4.78% 和 7.64% 的试验试样则呈脆性破坏。原状 Q<sub>2</sub> 黄土随着吸力降低(或含水量增大)和固结围压的增大, 应力-应变曲线由软化型逐渐向理想塑性及硬化型发展。在试验给出的吸力范围(100~450 kPa)内, 非饱和原状 Q<sub>2</sub> 黄土的黏聚力随吸力线性增加, 而内摩擦角随吸力的变化很小, 基本上可以认为是一常数。建议一种确定原状 Q<sub>2</sub> 黄土三轴剪切条件下屈服应力的方法, 得到的屈服净平均应力和屈服偏应力随吸力增大而增大; 同一吸力或含水量下屈服偏应力和屈服净平均应力则呈线性关系。

**关键词:** 土力学; Q<sub>2</sub> 黄土; 三轴剪切; 吸力; 强度; 屈服

**中图分类号:** TU 41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)02 - 383 - 07

## TRIAXIAL SHEAR PROPERTIES OF UNDISTURBED LOESS Q<sub>2</sub>

FANG Xiangwei<sup>1</sup>, CHEN Zhenghan<sup>1</sup>, SHEN Chunni<sup>1</sup>, WANG Hewen<sup>1</sup>, LIU Houjian<sup>2</sup>

(1. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 400041, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

**Abstract:** A series of triaxial shear tests with controlled suction and net constant confining pressure and the tests with controlled water content and constant confining pressure were conducted to study the effects of deformation, strength and yield properties of unsaturated undisturbed loess Q<sub>2</sub> with suctions or initial water contents. The test results show that the failure model of unsaturated undisturbed loess Q<sub>2</sub> with controlled suctions equaling 100, 300 and 450 kPa is shown with plastic failure; but the failure model of unsaturated undisturbed loess Q<sub>2</sub> with controlled initial water contents equaling 4.78% and 7.64%, respectively, is displayed with brittle failure. The stress-strain curves of undisturbed loess Q<sub>2</sub> will change from strain softening to strain hardening with the decrease of suction(or the increase of water content) and the increase of consolidation cell pressure. The cohesion of unsaturated undisturbed loess Q<sub>2</sub> has a linear increase with the increase of suction within research suction range(100 - 450 kPa), but the friction angle is found to have little change with the change of suction. A new method to identify the field stress of undisturbed loess Q<sub>2</sub> under triaxial shear condition is suggested. The net mean yield stress and deviatoric yield stress both increase with suction, where the deviatoric yield stress has a linear increase with net mean yield stress under the same suction or water content.

**Key words:** soil mechanics; loess Q<sub>2</sub>; triaxial shear; suction; strength; yield

**收稿日期:** 2007 - 06 - 27; **修回日期:** 2007 - 09 - 16

**基金项目:** 重庆市委自然科学基金资助项目(CSTC2006BB6119); 西北电力设计院科技项目(2006072401); 后勤工程学院研究生创新基金资助项目

**作者简介:** 方祥位(1975 -), 男, 1998 年毕业于西安理工大学水利水电学院水利水电建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事非饱和土力学与工程方面的研究工作。E-mail: fangxiangwei1975@163.com

## 1 引言

黄土是我国分布较广的区域性特殊土,分布面积约  $64 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占国土面积的 6.6%, 主要分布在黄河流域<sup>[1]</sup>。在西部大开发的基础设施、生态环境及国防等建设中, 都可能遇到各种黄土问题。

黄土属典型的非饱和土, 而国内对黄土已有的研究成果基本上属于总应力的研究范畴<sup>[2, 3]</sup>, 用现代非饱和土力学的理论和方法对黄土的力学特性进行研究, 是近年来才开始的一项工作, 因此黄土开始被视为非饱和土力学研究的重要对象。目前对非饱和黄土的研究和探讨也日益深化, 非饱和土特性研究的一般理论和方法, 对非饱和黄土力学的研究起着重要的推动作用。谢定义<sup>[2]</sup>指出, 当前迅速准确地拿出一批能作为理论发展可靠基础的、能反映非饱和黄土在力和水作用下本质性态的试验成果将有着极为重要的意义。

陈正汉等<sup>[4, 5]</sup>采用非饱和土的观点和方法探讨重塑黄土的变形、强度、屈服、水量变化特性, 取得了大量可靠的试验数据, 并建立了非线性本构关系。黄土具有一定的结构性, 对结构性原状黄土的试验研究意义更为深远。扈胜霞等<sup>[6]</sup>通过控制吸力的非饱和土直剪试验分析和探讨了非饱和原状黄土的强度特性。胡再强等<sup>[7~11]</sup>以三轴试验为基础, 研究了结构性黄土的湿陷及变形特性, 并从不同的角度建立了黄土的结构性本构模型。邢义川等<sup>[12]</sup>以杨凌非饱和原状黄土为对象进行了真三轴试验, 提出了一个非饱和黄土的三维有效应力公式及其参数的确定方法。

以往的研究主要以  $Q_3$  黄土为对象, 较少涉及  $Q_2$  黄土, 目前还未见较为系统研究吸力对非饱和原状  $Q_2$  黄土性质影响的研究成果。但随着工程建设规模的扩大, 越来越多的工程将直接涉及到  $Q_2$  黄土的地基处理<sup>[13]</sup>。因此, 对非饱和  $Q_2$  黄土的力学特性、工程性质等进行深入研究就显得非常迫切, 同时也具有较大的工程实用价值。

以陕西蒲城电厂  $Q_2$  黄土为研究对象, 本文的主要研究内容是非饱和原状  $Q_2$  黄土在三轴剪切过程中的变形、强度、屈服等特性, 并探讨吸力对非饱和原状  $Q_2$  黄土性质的影响, 为进一步研究  $Q_2$  黄土的本构关系和湿陷性等提供有价值的参考。

## 2 研究方法

### 2.1 试样制备

试验用土采用陕西蒲城电厂三期探井中  $J45$  孔中的黄土, 该试样取自地下 16.0~16.2 m 深处, 为  $Q_2$  黄土(L3)。黄土试样的物理力学指标见表 1。

表 1 黄土试样的物理力学指标  
Table 1 Physico-mechanical parameters of loess samples

| 土层 | 干密度<br>$\rho_d / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 含水量 $w / \%$ | 孔隙比 $e$     | 饱和度 $S_r / \%$ |
|----|---------------------------------------------------|--------------|-------------|----------------|
| L3 | 1.44~1.50                                         | 4.44~5.45    | 0.800~0.894 | 13.83~17.97    |

由于试样的初始含水量很低, 为 4%~6%, 初始吸力值高, 因此试样在切土盘上削完后, 用水膜转移法将黄土试样的初始含水量统一为 18% 左右。由于注入的水量接近 20 g, 如一次注入, 容易引起试样膨胀, 故注水分两次进行, 用医用 5 mL 注射器均匀注入, 每次注水间隔 12 h。注水结束后, 每 12 h 翻动一下试样, 在保湿罐中放置 48 h 以上方可取出装样。

### 2.2 试验方案

利用多功能土工三轴仪<sup>[14]</sup>, 对原状  $Q_2$  黄土进行了三轴剪切试验。

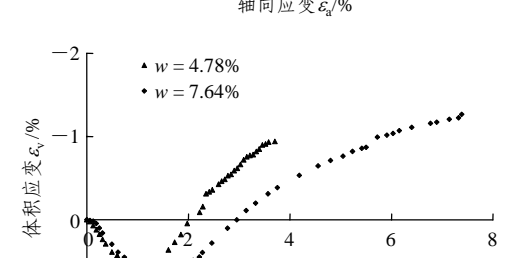
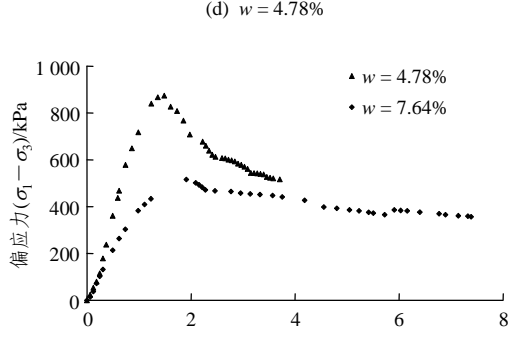
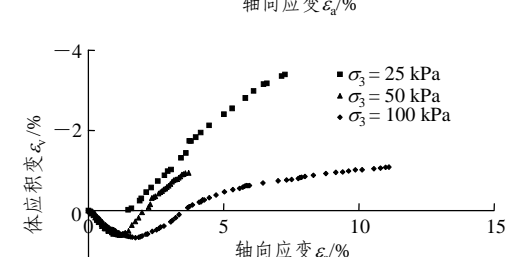
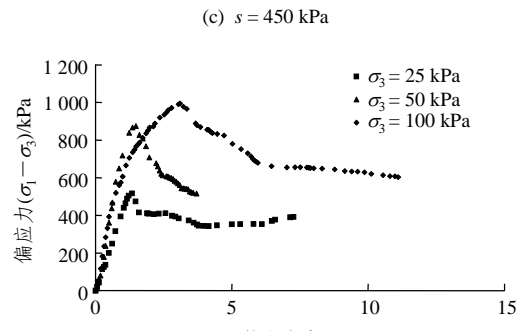
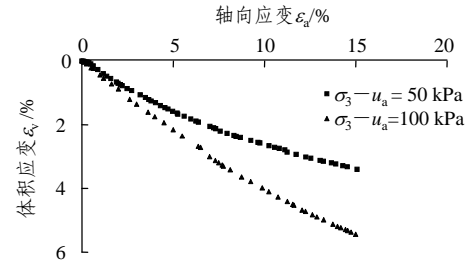
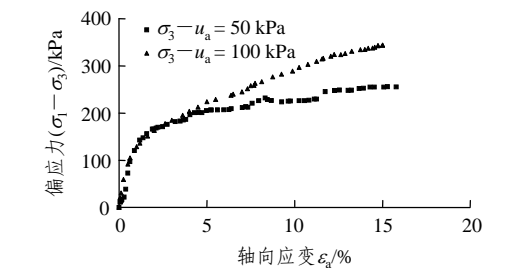
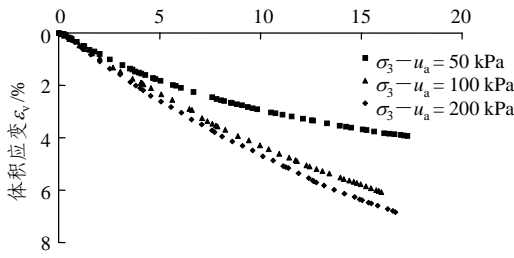
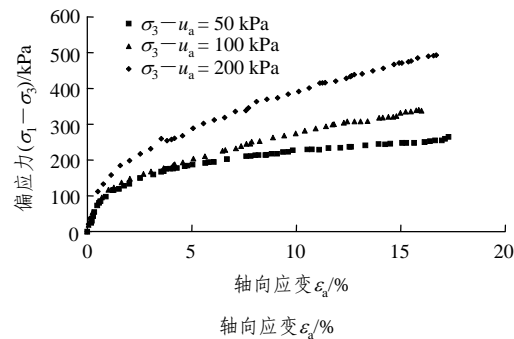
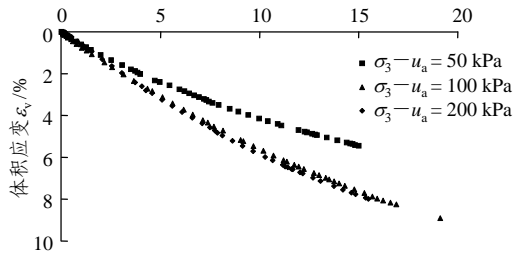
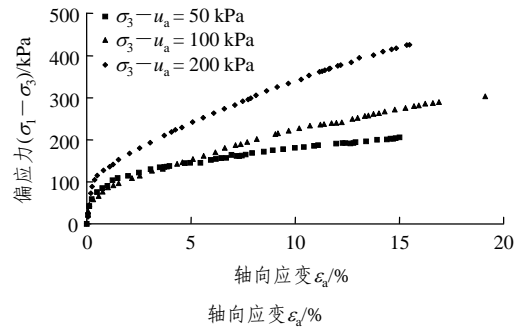
本文共做了 2 种 12 个原状样的三轴剪切试验, 1#~8# 试验为控制吸力和净围压为常数的三轴排水剪切试验, 净围压分别控制为 50, 100 和 200 kPa; 吸力分别控制为 100, 300 和 450 kPa(净围压为 200 kPa 的试验超过了仪器测试范围, 未做)。在非饱和土三轴压力室内, 先将制备的原状  $Q_2$  黄土试样进行一定吸力下的等压固结。待变形和排水稳定后进行控制吸力和净围压为常数的三轴排水剪切试验, 稳定的标准是体积应变在 2 h 内不超过  $0.063 \text{ cm}^3$ , 并且排水量在 2 h 内不超过  $0.012 \text{ cm}^3$ ; 其剪切速率为  $0.0167 \text{ mm/min}$ 。9#~12# 试验由于吸力过高, 超过了仪器及管路等的承受范围, 故改为控制初始含水量和围压为常数的三轴剪切试验, 控制初始含水量为 4.78%(围压为 25, 50, 100 kPa)和 7.64%(围压为 50 kPa)。先将制备的原状  $Q_2$  黄土试样进行等压固结。待变形稳定后进行控制初始含水量和围压为常数的三轴剪切试验, 剪切速率仍为  $0.0167 \text{ mm/min}$ 。

## 3 试验结果分析

### 3.1 三轴剪切应力 - 应变关系曲线

大量试验结果表明, 原状黄土具有一定结构强度, 其应力 - 应变曲线随着成因时代和受力状态不

同而异, 一般呈现为 3 种类型和 5 种形式, 即脆性破坏型(强软化、弱软化), 塑性破坏型(强化化、弱硬化)和理想塑性型<sup>[15]</sup>。本文研究的原状 Q<sub>2</sub> 黄土, 其应力 - 体积应变 - 轴向应变关系如图 1 所示(图中  $s$  代表吸力,  $w$  代表含水量,  $\sigma_3 - u_a$  代表净围压,  $\sigma_3$  代表围压)。



(e)  $\sigma_3 = 50$  kPa

图 1 应力 - 体积应变 - 应变关系

Fig.1 Relationship between deviatoric stress, volumetric strain and strain

从图 1 可以看出, 控制吸力为常数的 3 组 8 个试验试样呈塑性破坏, 而控制含水量(吸力相当高)

试验试样呈脆性破坏。受结构性影响，应力 - 应变的曲线有一定的交叉现象(图 1(a)和(d)较明显)，且交叉的两条曲线均为净围压为 50 和 100 kPa。原状 Q<sub>2</sub> 黄土随吸力降低(含水量增大)和固结围压的增大，应力 - 应变曲线由软化型逐渐向理想塑性及硬化型发展。

图 1(a)~(c)是在相同吸力、不同净围压下原状 Q<sub>2</sub> 黄土应力 - 应变关系曲线。随着净围压增大，其应力 - 应变曲线由理想塑性(或弱硬化型)向强硬化型发展；当净围压为 50 kPa 时，剪缩体积应变随着剪切的进行渐趋稳定，而当净围压分别增大到 100 和 200 kPa 时，剪缩体积应变还有继续发展的趋势。

图 1(d)和(e)是控制含水量的试验结果。由于含水量较低(吸力相当高)，应力 - 应变曲线均呈软化型，破坏峰值高，破坏应变小，峰值前的应力 - 应变关系曲线近似直线，峰值后强度软化，曲线明显的分为 3 段：

(1) 第 1 段：应力随应变增大段

第 1 段应力随应变增大具有一定的剪缩特性，反映出结构保持完好或良好状态下的变形。当其含水量和围压均较小时 ( $w = 4.78\%$  ,  $\sigma_3 = 25$  kPa;  $w = 4.78\%$  ,  $\sigma_3 = 50$  kPa)，则基本上呈线性增大；当其含水量或围压较大时 ( $w = 4.78\%$  ,  $\sigma_3 = 100$  kPa;  $w = 7.64\%$  ,  $\sigma_3 = 50$  kPa) 时，则呈非线性增大，说明随含水量和围压增大，结构性逐渐减弱。

(2) 第 2 段：应力随应变减小段

第 2 段应力随应变减小段已开始出现剪胀现象，反映结构的破损阶段，颗粒之间产生滑移，剪切破裂面逐渐形成。

(3) 第 3 段：应力随应变增加基本不变段

第 3 段应力随应变增加基本不变段，此时维持其残余强度，剪切破裂面已经形成，按理说此时剪缩和剪胀应处于相对平衡，体积应变逐渐趋于稳定，但是由于围压较小，剪切破裂面继续鼓胀，因而测出的体积应变继续增大。

3.2 强度特性

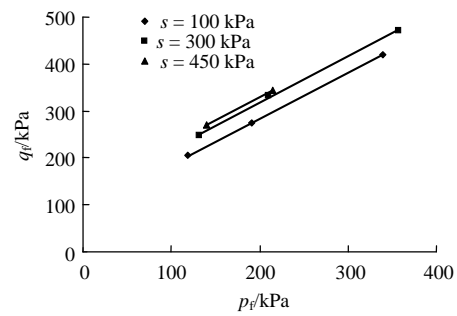
控制吸力和净围压为常数的三轴排水剪切试验呈塑性破坏，控制含水量和围压为常数的三轴剪切试验则呈脆性破坏，针对不同的破坏形式选用相应的破坏标准。对塑性破坏，取轴应变  $\epsilon_a = 15\%$  时的应力为破坏应力；对脆性破坏，取  $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_a$  曲线上的峰值点对应的应力为破坏应力。12 个三轴剪切试验的破坏应力及强度参数列于表 2 中；控制吸力和含水量试验的  $q_f - p_f$  关系如图 2 所示。

表 2 黄土的强度参数

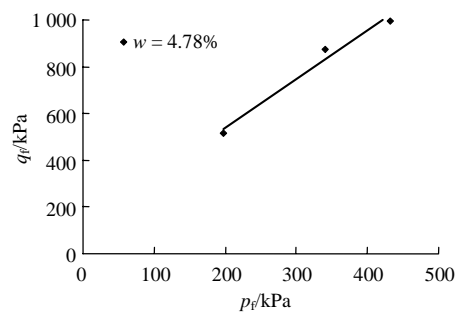
Table 2 Strength parameters of loess

| s/kPa<br>或 w/% | 净围压<br>/kPa | $q_f$ /kPa | $p_f$ /kPa | $\xi$ /kPa | $\tan \omega$ | c/kPa | $\varphi$ /(°) |
|----------------|-------------|------------|------------|------------|---------------|-------|----------------|
| s = 100        | 50          | 205        | 118.3      |            |               |       |                |
|                | 100         | 274        | 191.3      | 89.24      | 0.97          | 42.3  | 24.73          |
|                | 200         | 420        | 340.0      |            |               |       |                |
| s = 300        | 50          | 247        | 132.3      |            |               |       |                |
|                | 100         | 332        | 210.7      | 118.76     | 0.99          | 56.3  | 25.18          |
|                | 200         | 471        | 357.0      |            |               |       |                |
| s = 450        | 50          | 269        | 139.7      |            |               |       |                |
|                | 100         | 344        | 214.7      | 129.33     | 1.00          | 61.3  | 25.39          |
|                | 200         | 471        | 357.0      |            |               |       |                |
| w = 4.78       | 25          | 516        | 197.0      |            |               |       |                |
|                | 50          | 874        | 341.3      | 121.67     | 2.08          | 71.2  | 50.65          |
|                | 100         | 996        | 432.0      |            |               |       |                |
| w = 7.64       | 50          | 516        | 222.0      | -          | -             | -     | -              |

注： $q_f$  和  $p_f$  分别为破坏偏应力和破坏净平均应力； $\xi$  和  $\tan \omega$  分别为直线的截距和斜率，用最小二乘法确定；c 和  $\varphi$  分别为黏聚力和内摩擦角。



(a)



(b)

图 2 p-q 平面内的强度包络线

Fig.2 Strength envelopes in p-q plane

强度参数可由 p-q 平面内的强度包线求得，由图 2 可知，吸力(或含水量)相同的一组试验点落在一条直线上，则可用下式表达：

$$q_f = \xi + p_f \tan \omega \tag{1}$$

土的内摩擦角  $\varphi$ <sup>[4]</sup> 可表示为

$$\sin \varphi = \frac{3 \tan \omega}{6 + \tan \omega} \tag{2}$$

土的黏聚力  $c^{[4]}$  则可表示为

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

由式(2), (3)可计算出土的强度参数  $c$  和  $\varphi$ , 其值列于表 2 中。从表 2 中可以看出, 控制吸力试验的黏聚力  $c$  随吸力增大而增大, 而内摩擦角  $\varphi$  几乎没有变化, 相应的关系如图 3, 4 所示。

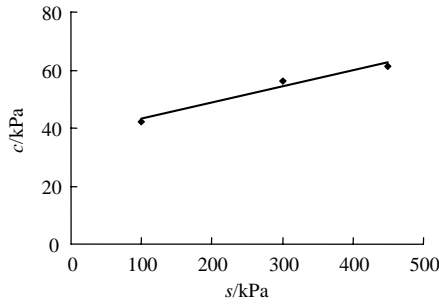


图 3 c-s 关系曲线

Fig.3 Relationship curve between  $c$  and  $s$

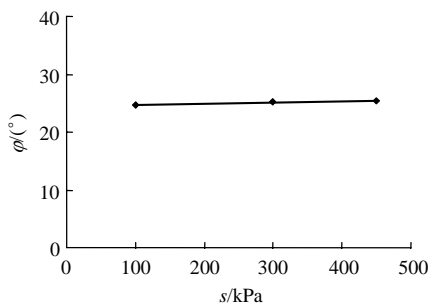


图 4  $\varphi$ -s 关系曲线

Fig.4 Relationship curve between  $\varphi$  and  $s$

在试验所做的吸力范围内, 黏聚力  $c$  随着吸力的增加呈线性增加(见图 3); 由此可以得到该试验土的吸力摩擦角  $\varphi_b = 3.2^\circ$ 。内摩擦角  $\varphi$  在试验所做的吸力范围内只有微小的变化(见图 4), 可以认为是一常数, 且等于饱和土的内摩擦角  $\varphi'$ 。采用 D. G. Fredlund 和 H. Rahardio<sup>[16]</sup>提出的非饱和土抗剪强度理论公式, 即

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (4)$$

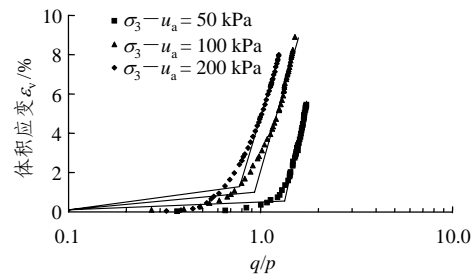
式中:  $c'$ ,  $\varphi'$  分别为饱和土的黏聚力和内摩擦角;  $\sigma - u_a$  为净竖向应力;  $u_a - u_w$  为吸力;  $\varphi_b$  为抗剪强度随吸力而增加的速率。

对于该黄土试样, 其强度参数:  $c' = 37.6$  kPa,  $\varphi' = 25.1^\circ$ ,  $\varphi_b = 3.2^\circ$ 。

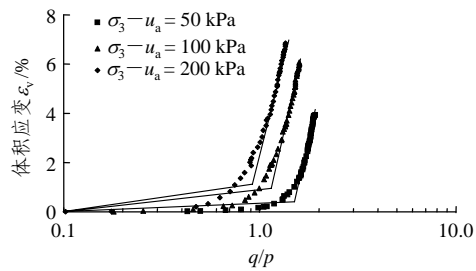
应当指出, J. K. M. Gan 等<sup>[17]</sup>的研究结果表明:  $\varphi'$  对于一个固定的试样并非常数, 而是与吸力有关的变数。本文所做的试验也可以验证这一点, 当  $w = 4.78\%$  时, 吸力较高, 此时内摩擦角为  $50.65^\circ$ , 不再等于低吸力时的值, 而是随着吸力的增加而增大。

### 3.3 屈服特性

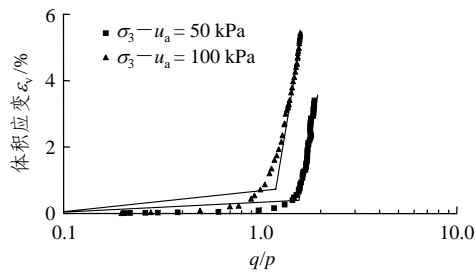
如何判断非饱和原状 Q<sub>2</sub> 黄土在三轴应力条件下是否屈服是一个值得研究的问题。本文通过对比  $\varepsilon_v - \lg q$  和  $\varepsilon_v - \lg p$  以及  $\varepsilon_v - \lg(q/p)$  等关系曲线确定屈服点, 发现由前二者曲线所得屈服点在  $q-p$  平面上分布较离散。同时考虑到三轴应力条件下土的屈服, 不仅有球应力的影响, 还有偏应力的贡献。因此本文建议利用  $\varepsilon_v - \lg(q/p)$  关系曲线确定屈服点。各吸力和含水量试验的  $\varepsilon_v - \lg(q/p)$  关系曲线( $w = 4.78\%$  时只研究剪缩部分)如图 5 所示。



(a)  $s = 100$  kPa



(b)  $s = 300$  kPa



(c)  $s = 450$  kPa



(d)  $w = 4.78\%$

图 5 体积应变  $\varepsilon_v$  与应力比  $\lg(q/p)$  的关系

Fig.5 Relationship curves between volumetric strain  $\varepsilon_v$  and stress ratio  $\lg(q/p)$

从图 5 可知, 三轴剪切试验的  $\varepsilon_v - \lg(q/p)$  关系曲线的首尾部分可用直线近似, 两直线的交点所对应的应力作为屈服应力( $p_y, q_y$ ), 各试验的屈服应力列于表 3。把各试验点的( $p_y, q_y$ )绘在  $p-q$  平面上(见图 6), 屈服点的分布呈现良好的规律性。虽然利用图 6 上的点尚不足以确定屈服面的形状, 但可以看出屈服曲线随吸力增加向外扩展。

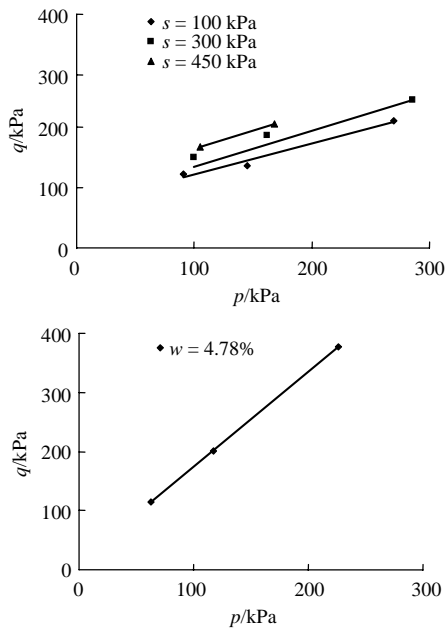


图 6 屈服点在  $p-q$  平面上的分布

Fig.6 Yield points for various suctions in  $p-q$  plane

由图 6 可知, 吸力(或含水量)相同的一组试验其屈服点落在一条直线上, 可用下式表达:

$$q_y = \xi_y + p_y \tan \omega_y \quad (5)$$

式中:  $\xi_y$  和  $\tan \omega_y$  分别为直线的截距和斜率, 用最小二乘法确定, 其值列于表 3 中。

表 3 黄土的屈服应力  
Table 3 Yield stresses of loess

| $s/\text{kPa}$ 或 $w/\%$ | 净围压/ $\text{kPa}$ | $q/p$ | $p_y/\text{kPa}$ | $q_y/\text{kPa}$ | $\xi_y/\text{kPa}$ | $\tan \omega_y$ |
|-------------------------|-------------------|-------|------------------|------------------|--------------------|-----------------|
| $s = 100$               | 50                | 1.34  | 91               | 122              | 69.54              | 0.510 6         |
|                         | 100               | 0.93  | 145              | 135              |                    |                 |
|                         | 200               | 0.78  | 270              | 210              |                    |                 |
| $s = 300$               | 50                | 1.50  | 100              | 150              | 90.67              | 0.587 6         |
|                         | 100               | 1.14  | 162              | 185              |                    |                 |
|                         | 200               | 0.91  | 286              | 259              |                    |                 |
| $s = 450$               | 50                | 1.58  | 105              | 166              | 102.67             | 0.603 2         |
|                         | 100               | 1.21  | 168              | 204              |                    |                 |
|                         | 25                | 1.81  | 63               | 114              |                    |                 |
| $w = 4.78$              | 50                | 1.72  | 117              | 201              | 12.28              | 1.613 7         |
|                         | 100               | 1.67  | 226              | 377              |                    |                 |
|                         | 50                | 1.63  | 109              | 178              |                    |                 |

由表 3 可知,  $\xi_y$  和  $\tan \omega_y$  均随吸力增加而增大。图 7 给出  $\xi_y, \omega_y$  和  $s$  的关系曲线, 从图 7 中可以看出, 它们均呈良好的线性关系。

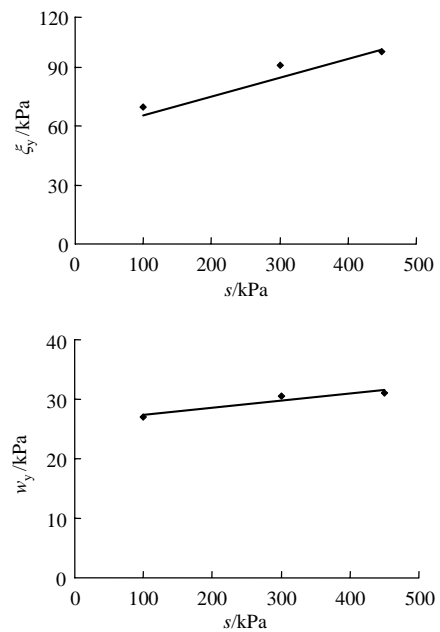


图 7  $\xi_y, \omega_y$  和  $s$  关系曲线

Fig.7 Relationship curves between  $\xi_y, \omega_y$  and  $s$

## 4 结 论

(1) 原状  $Q_2$  黄土控制吸力为 100, 300, 450 kPa 的试验试样呈塑性破坏, 而控制初始含水量为 4.78% 和 7.64% 的试验试样呈脆性破坏。原状  $Q_2$  黄土随吸力降低(或含水量增大)和固结围压的增大, 应力 - 应变曲线由软化型逐渐向理想塑性及硬化型发展。

(2) 控制吸力和初始含水量的试验在  $p-q$  平面内的强度包线为直线; 在试验研究的吸力范围(100~450 kPa)内, 非饱和原状  $Q_2$  黄土的黏聚力随吸力线性增加; 内摩擦角随吸力的变化很小, 可以认为是一常数。

(3) 建议利用  $\varepsilon_v - \lg(q/p)$  关系曲线确定原状  $Q_2$  黄土三轴剪切条件下的屈服应力, 得到的屈服净平均应力和屈服偏应力随吸力增大, 同一吸力或含水量下屈服偏应力和屈服净平均应力呈线性关系。

## 参考文献(References):

[1] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50025 - 2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.(The National

- Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50025 - 2004 Code for building construction in collapsible loess zone[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2004.(in Chinese))
- [2] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 273 - 284.(XIE Dingyi. The past, present and future of research on mechanical characteristics and application of loess[J]. Underground Space, 1999, 19(4): 273 - 284.(in Chinese))
- [3] 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 Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3 - 13.(in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 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.(CHEN Zhenghan, ZHOU Haiqing, FREDLUND D G. Nonlinear model for unsaturated soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(5): 603 - 608.(in Chinese))
- [6] 扈胜霞, 周云东, 陈正汉. 非饱和和原状黄土强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 660 - 664.(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 - 664.(in Chinese))
- [7] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 142 - 4 146.(HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Deformation properties of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 142 - 4 146.(in Chinese))
- [8] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 565 - 569.(HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Constitutive model of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 565 - 569.(in Chinese))
- [9] 邵生俊, 李彦兴, 周飞飞. 湿陷性黄土结构损伤演化特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4 161 - 4 165.(SHAO Shengjun, LI Yanxing, ZHOU Feifei. Structural damage evolvement properties of collapsible loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 161 - 4 165.(in Chinese))
- [10] 邵生俊, 罗爱忠, 于清高, 等. 加荷增湿作用下  $Q_3$  黏黄土的结构损伤特性[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2 078 - 2 081.(SHAO Shengju, LUO Aizhong, YU Qinggao, et al. Structural damage properties of loess  $Q_3$  under triaxial loading and moistening[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2 078 - 2 081.(in Chinese))
- [11] 骆亚生, 谢定义. 复杂应力条件下土的结构性本构关系[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2005, 37(5): 14 - 18.(LUO Yasheng, XIE Dingyi. Structural constitutive relation of soils under complex stress conditions[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science), 2005, 37(5): 14 - 18.(in Chinese))
- [12] 刑义川, 谢定义, 汪小刚, 等. 非饱和黄土的三维有效应力[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 288 - 293.(XING Yichuan, XIE Dingyi, WANG Xiaogang, et al. 3D effective stress of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(3): 288 - 293.(in Chinese))
- [13] 李大展, 何颐华, 隋国秀.  $Q_2$  黄土大面积浸水试验研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 1 - 11.(LI Dazhan, HE Yihua, SUI Guoxiu. Study and test on immersion of loess  $Q_2$  in large area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 1 - 11.(in Chinese))
- [14] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 非饱和土与特殊土测试技术新进展[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 147 - 169.(CHEN Zhenghan, SUN Shuguo, FANG Xiangwei, et al. Recent advances in measuring technology for unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 147 - 169.(in Chinese))
- [15] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 1997.(LIU Zudian. Mechanics of loess and engineering[M]. Shaanxi: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.(in Chinese))
- [16] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1993.
- [17] GAN J K M, FREDLUND D G, RAHARDJO H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soils using the direct shear test[J]. Canadian Geotechnique Journal, 1988, 25(3): 500 - 510.