

结构损伤对膨胀土屈服特性的影响

姚志华¹, 陈正汉^{1,2}, 黄雪峰¹, 苗强强¹

(1. 解放军后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 401331; 2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 利用与 CT 机配套的非饱和多功能土工三轴仪, 对干湿循环不同次数的膨胀土进行控制吸力为常数的各向等压试验, 从细观上研究损伤对膨胀土屈服应力的影响。研究表明: 屈服应力随着结构损伤的增大而减小; 屈服前压缩指数随着结构损伤的增大而增大。根据细观试验数据, 分别提出结构参数与屈服应力和宏观变量之间的定量表达式, 进而将 Barcelona 膨胀土模型推广到结构损伤情况。

关键词: 土力学; 膨胀土; 干湿循环; 结构损伤; 屈服; 结构参数; Barcelona 膨胀土模型

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)07 - 1503 - 10

INFLUENCE OF STRUCTURAL DAMAGE ON YIELDING CHARACTERISTICS OF EXPANSIVE SOILS

YAO Zhihua¹, CHEN Zhenghan^{1,2}, HUANG Xuefeng¹, MIAO Qiangqiang¹

(1. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401331, China; 2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environment Disaster Control Engineering Under the state ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: By using CT-triaxial apparatus for unsaturated soils, compression tests under confined suction are carried out with remolded expansive soils which are suffered from multi-drying-wetting cycles. The yielding characteristics of expansive soils influenced by structural damage are researched from the viewpoint of meso-scale. The results indicate that, yielding stress would drop off gradually while the level of structural damage increases. Compression index before yielding stress appearing would increase slowly while damage level would increase gradually. Based on the test data, the quantitative equations of structural parameters along with yielding stress and macrovariable are employed for the Barcelona expansive model with structural damage.

Key words: soil mechanics; expansive soils; drying-wetting cycles; structural damage; yielding; structure parameter; Barcelona expansive model

1 引言

屈服特性是非饱和土本构关系研究的一项重要内容。E. E. Alonso 等^[1]利用屈服特性及临界状态概念先后建立了 Barcelona 非饱和土弹塑性模型和 Barcelona 膨胀土弹塑性模型框架(BExM)^[2], 前者

包括湿陷加载屈服(LC)和吸力增加屈服(SI)两个屈服面; 后者除 LC 和 SI 屈服面外, 增加了 SD 屈服面(即吸力减少屈服面)。S. J. Wheeler 等^[3-5]对非饱和土的屈服准则和屈服面做了进一步的研究; 陈正汉^[6]通过大量的试验提出了一个新的吸力增加屈服条件, 并建议了一个确定三轴剪切条件下的屈服应力的新方法; 黄海等^[7]通过试验提出了 LC 和 SI

收稿日期: 2009 - 12 - 25; **修回日期:** 2010 - 04 - 30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372115, 10672182, 10902091); 重庆市自然科学基金项目(2009BB8114)

作者简介: 姚志华(1983 -), 男, 2006年毕业于兰州理工大学建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事非饱和土本构关系及数值分析方面的研究工作。E-mail: yaozhihua1983@163.com

屈服曲线为一条统一的屈服线，并给出了相应的数学表达公式；卢再华和李刚^[8]考虑到膨胀土是湿胀而不是湿陷，把 Barcelona 膨胀土弹塑性模型中 LC 屈服改为 LY 屈服，即加载屈服，并引入剪切屈服面 SY 以反映剪胀。

膨胀土是具有显著结构性的典型非饱和土，结构性对其变形特性和屈服特性有重要影响。关于将结构损伤与非饱和膨胀土屈服特性联系起来的研究迄今未见报道。本文利用非饱和土多功能 CT 三轴仪，对干湿循环后的膨胀土试样进行各向等压加载试验，并进行 CT 实时扫描，找出结构损伤与屈服特性的联系，将 Barcelona 膨胀土模型推广到结构损伤的情况。

2 试验概况

2.1 试样制备

试验用土为南水北调中线工程陶岔引水渠坡的膨胀土，重塑制样，试样直径和高度分别为 3.91 和 8 cm，横截面面积为 12 cm²，初始体积为 96 cm³，初始干密度为 1.5 g/cm³，初始含水率为 26.55%，相对密度为 2.73。

加载前先对试样进行干湿循环：首先试样在烘箱中进行烘干，控制温度 35 °C，无鼓风状态 24 h；其次试样根据目标饱和度 88.39% (初始状态) 计算加水量，并对试样分多次加水，每次加水后试样在保湿罐中静置 72 h 以上，达到水分均匀目的。此过程为一个干湿循环。干湿循环过程试样外表面不同程度出现裂隙，裂隙纵横交错，图 1 为 3[#] 试样第三次烘干时的照片，限于篇幅其余试样裂隙开展图不再列举。



图 1 3[#] 试样第三次烘干时的照片

Fig.1 Photo of sample #3 after the third drying procedure

本文共做了 6 个控制吸力为常数的各向等压加载试验，加载前的试样状态参数及试验方案如表 1

表 1 试样状态参数及试验方案

Table 1 State parameters of samples and test scheme

试样编号	体积 /cm ³	干密度 / (g · cm ⁻³)	孔隙比	含水率 /%	饱和度 /%	吸力 /kPa	循环次数 /次
0 [#]	95.00	1.500	0.820	26.55	88.39	0	0
1 [#]	88.42	1.637	0.668	21.63	88.39	50	1
2 [#]	89.82	1.586	0.721	23.32	88.29	50	2
3 [#]	92.05	1.569	0.739	24.05	88.73	50	3
4 [#]	95.17	1.506	0.813	26.44	88.67	50	4
5 [#]	95.67	1.505	0.814	26.34	88.33	100	4

所示。净平均应力分级施加，试验结束时净平均应力控制为 350 kPa，并在各级荷载稳定后对试样进行实时 CT 跟踪扫描。试验过程中由于排水孔隙水压力为 0，所以试验只需控制围压 σ_3 和气压 u_a 。

2.2 试验稳定标准和排水量校正

对控制吸力的各向等压加载试验采用的稳定标准为：在 2 h 内，试样的体变和排水量分别小于 0.006 3 和 0.012 cm³。完成一个试验约需 10~16 d，其历时长短取决于试验最终达到的净平均应力和干湿循环的次数以及损伤程度的大小。

由于试验周期较长，试样中少量气体透过陶土板进入排水量测系统以及排水系统自身的量测误差，所以应对排水量测值进行校正。试验结束时用烘干法量测试样最终含水率，由试样初始含水率和最终含水率之差，可算出试样的实际排水量，再根据实际排水量去校正量测值。试样排水量的实测值与校正值见表 2 (下文分析含水率均采用校正值)。由表 2 可知试验中干湿循环次数越多，试验每级荷载所需要的时间越长。

表 2 试样排水量的实测值与校正值

Table 2 Measured values and adjusted values of water drainage from the test samples

试样编号	历时 /d	测量值 /cm ³	校正值 /cm ³	差值 /cm ³	相对误差 /%
0 [#]	15	3.03	3.32	0.29	8.73
1 [#]	10	2.09	1.96	0.10	5.10
2 [#]	12	3.73	3.95	0.21	5.32
3 [#]	14	4.34	4.51	0.17	3.77
4 [#]	15	5.33	5.63	0.30	4.52
5 [#]	16	7.54	7.40	0.14	1.89

2.3 试验仪器

2006 年，后勤工程学院建立了 CT 三轴科研工作站 (见图 2)，并对 CT 机配套的非饱和土三轴仪进行了改进，升级为多功能土工三轴仪^[9, 10]。



图 2 CT - 三轴科研工作站

Fig.2 CT-triaxial apparatus for scientific research

2.4 试样扫描

设定试样中间线为扫描 0 点, 扫描上 1/3 和下 1/3 两个截面, 分别代表 *b* 截面和 *a* 截面(见图 3)。得到相应截面的 CT 数 *ME* 和方差 *SD*。每个试样共进行了 9 次扫描, 每次扫描对应的净平均应力为 0, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 250 和 350 kPa, 一共取得 108 张图像(其中 0 kPa 表示干湿循环后没有施加荷载状态)。试验为了避免肉眼对图像观察产生的误差, CT 图像窗宽、窗位设定在 400 和 1 550, 窗宽、窗位的不同不会影响试验 CT 扫描数据。CT 机扫描参数见表 3。

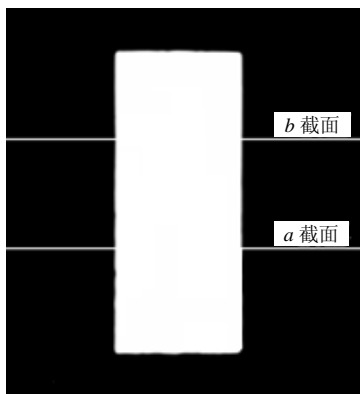


图 3 试样截面扫描位置

Fig.3 Image of CT scanning positions

表 3 CT 机扫描参数

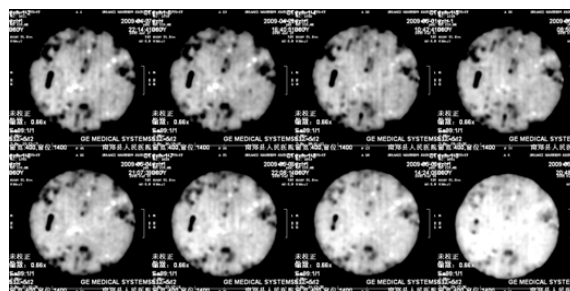
Table 3 Parameters for CT scanning

电压/kV	电流/mA	时间/s	层厚/mm	放大系数
120	165	3	3	5

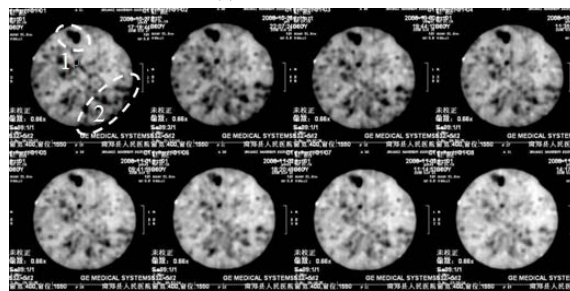
3 试验结果分析

3.1 CT 扫描图像分析

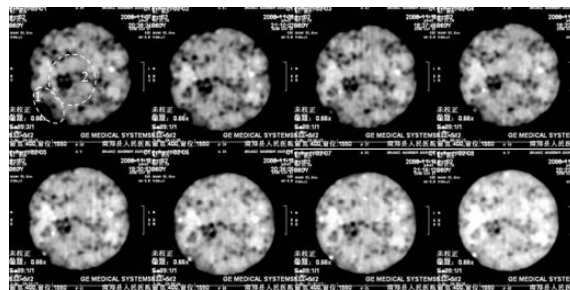
试样干湿循环过程没有进行 CT 扫描, 姚志华等^[1]已经做过这方面的工作, 此处不再研究。图 4 分别为 0[#], 1[#], 2[#], 3[#]和 5[#]试样施加荷载并稳定后



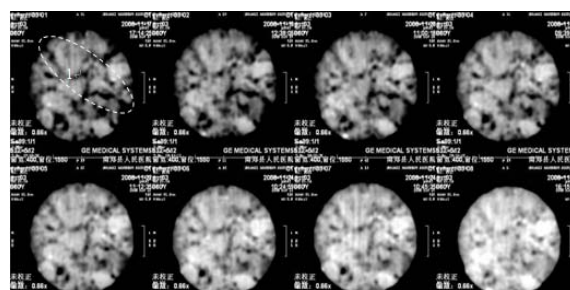
(a) 0[#]试样, *a* 截面



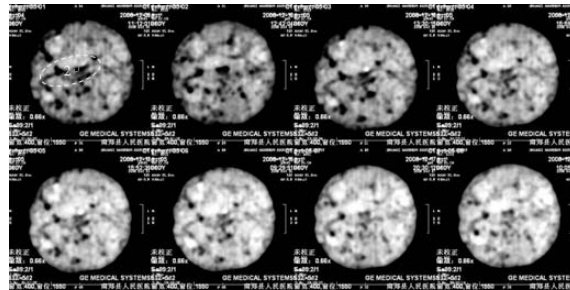
(b) 1[#]试样, *a* 截面



(c) 2[#]试样, *a* 截面



(d) 3[#]试样, *a* 截面



(e) 5[#]试样, *b* 截面

图 4 各级荷载对应的试样 CT 扫描图像

Fig.4 CT images of samples during different loading states

一个截面的扫描图像, 限于篇幅只介绍 1[#]试样微观结构变化情况。

图 4(b)为 1[#]试样各级荷载对应的 *a* 截面 CT 扫描图像。图中可清晰发现试样裂隙发育并不明显，只在外表层存在，这与干湿循环次数有关。试样初次扫描图像外边缘粗糙，凸凹明显。图 4(b)椭圆 1 存在一个较大空洞，在试验结束后也没有完全消失，这不仅与试样只干湿循环 1 次造成试样损伤较小有关，而且与试样干缩较大湿胀较小形成的干密度相对较大有关；椭圆 2 处有裂隙存在且伴随较多小空洞，显示了试样在此位置的开裂。从图 4(b)中整体来看试样干缩湿胀产生的微裂隙随着净平均应力的增大很快闭合，内部空洞的闭合却比较缓慢。试样施加 150 kPa 净平均应力扫描时，代表黑色区域的空洞明显减少，这与试样在较大净平均应力下已经屈服有关。

图 5 为干湿循环 4 次的 4[#]试样初始状态 CT 扫描图像。4 次干湿循环后的试样裂隙发育显著，结构性、整体性较差。*a* 和 *b* 截面中存在大量的裂隙和空洞，截面边缘极其粗糙。*a* 截面 1 处裂隙把试样划分为 4 块；*b* 截面 2 处裂隙已经完全分割了整个截面，内部裂隙明显，边缘裂隙却有所闭合，这是试样增湿后膨胀产生的结果。4[#]试样经过 4 次干湿循环后裂隙发育明显，使得 CT 数 *ME* 相对较小、方差 *SD* 较大。

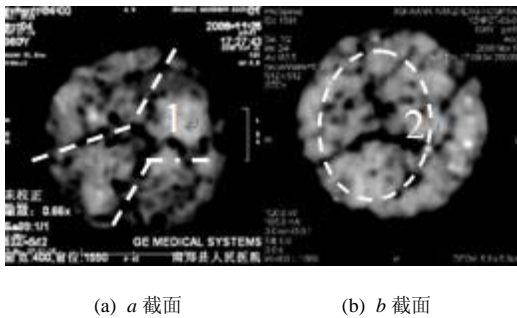
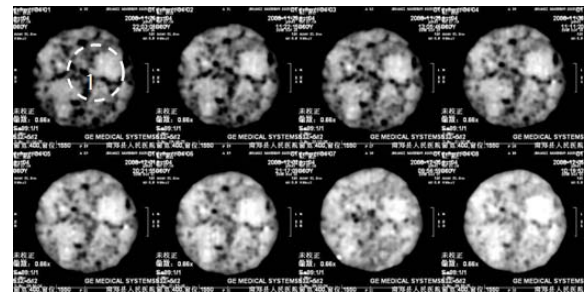
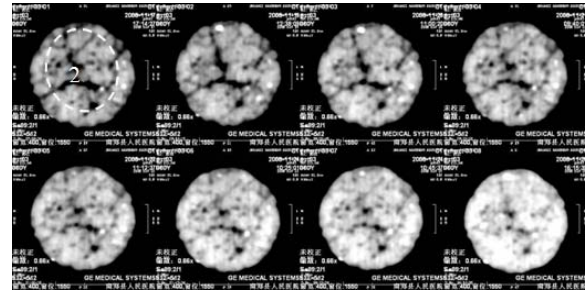


图 5 干湿循环 4 次的 4[#]试样初始状态 CT 扫描图像
Fig.5 CT images of sample #4 undergone drying-wetting cycles of four times

图 6 为 4[#]试样两截面各级荷载对应的 CT 扫描图像。25 kPa 时所扫描 2 个截面与图 4(e)第一张图像相比，具有较大初始损伤的 *a*, *b* 截面在围压和吸力的作用下，裂隙和空洞都有不同程度的闭合。*a* 截面中的圆 1 和 *b* 截面中的圆 2 被裂隙和空洞分割，在荷载作用下圆 1 中白色面积逐渐扩大，而且颜色越加发白，此处的密度要高于其他部位；圆 2 处裂隙在围压和吸力作用下逐渐闭合，但在第 3 次扫描后裂隙闭合有了质的变化，这与试样屈服有关。



(a) *a* 截面



(b) *b* 截面

图 6 4[#]试样各级荷载对应的 CT 扫描图像

Fig.6 CT images of sample #4 in different loading states

综上所述，无约束条件下干湿循环制造初始损伤，干湿循环次数越多，试样完整性越差。CT 扫描图像在屈服后会发生显著的变化，试样截面裂隙和空洞较大程度地闭合。膨胀土在外荷载作用下，空洞的闭合要滞后于裂隙。裂隙和空洞的闭合在屈服前后可划分为 2 个阶段，屈服前裂隙和空洞闭合较快，而屈服后裂隙演化为空洞且原有空洞闭合趋于缓慢。

3.2 试验数据分析

3.2.1 干湿循环对屈服应力、水量变化指标的影响

图 7 为 0[#]~4[#]试样吸力 50 kPa 不同干湿循环次数的 v - lgp 关系。其中比容 $v=1+e$ ， e 为孔隙比；净平均应力 $p=(\sigma_1+\sigma_2+\sigma_3)/3-u_a$ ，其中 σ_1, σ_2 和 σ_3 为 3 个主应力， u_a 为孔隙气压力。由图 7 可知，同一试样的试验点近似位于两相交的直线段上，两直线段的交点可作为屈服点，屈服点的净平均应力就是屈服应力^[6, 12]。把图 7 中屈服点列于表 4 中，可见同一吸力下随着干湿循环次数的增加，试样屈服应力逐渐减小；而屈服点前后直线段斜率可称为压缩指数，从表 5 中可知由 v - lgp 曲线确定的压缩指数屈服前随着干湿循环次数的增加而逐渐增大；屈服后的直线段斜率除 1[#]试样外基本变化不大，故初步认为干湿循环对试样屈服后的压缩指数没有质的影响。

图 8 为 0[#]~4[#]试样含水量和体应变指标与净平均应力之间的关系曲线。由图中可知 ϵ_w - p 和 w - p 可以近似用一条直线代替其关系，直线的斜率用最小

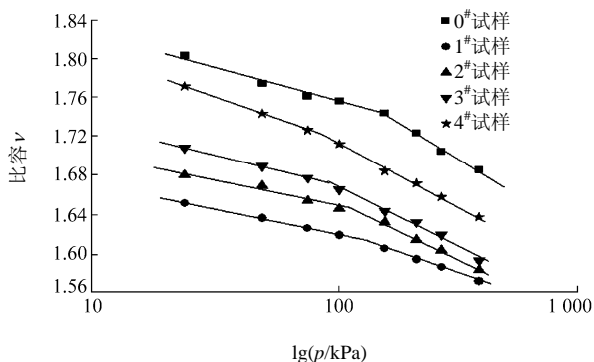


图 7 相同吸力不同干湿循环次数试样的 v - $\lg p$ 关系
Fig.7 Relationship between specific volume and net mean stress with same suction and different cycle times

表 4 各试样屈服应力值

Table 4 Values of stress yielding of every sample kPa

试样编号	屈服应力			平均值
	(1)	(2)	(3)	
0#	150.34	153.78	139.93	148.01
1#	134.58	145.94	122.35	134.29
2#	116.61	125.28	109.49	116.95
3#	94.25	100.75	91.97	95.73
4#	82.14	86.12	82.11	83.46
5#	166.74	175.39	168.24	170.12

注: 表中各试样屈服应力(1)由 v - $\lg p$ 曲线确定; 屈服应力(2)由 ME - P 曲线确定; 屈服应力(3)由 SD - P 曲线确定。

表 5 试验相关的土性参数值

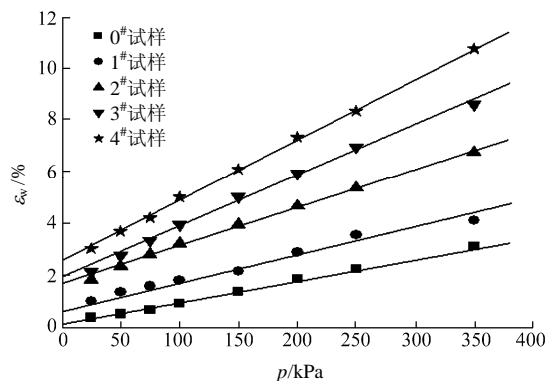
Table 5 Values of soil parameters related to hydaustatic triaxial compressure test

试样编号	压缩指数		水相体变指标	
	屈服前	屈服后	$\lambda_w(s)$	$\beta(s)$
0#	-0.074 1	-0.154 2	0.008 8	-0.006 1
1#	-0.056 7	-0.089 3	0.008 3	-0.005 0
2#	-0.050 8	-0.131 6	0.014 8	-0.009 6
3#	-0.064 8	-0.136 6	0.020 1	-0.014 6
4#	-0.094 2	-0.134 4	0.023 6	-0.015 3
5#	-0.055 7	-0.171 5	0.021 2	-0.015 9

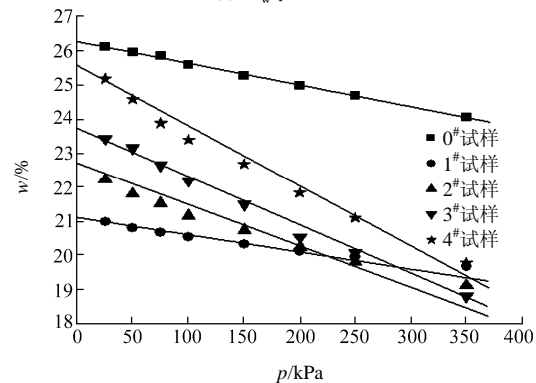
二乘法拟合, 其值分别用 $\lambda_w(s)$ 和 $\beta(s)$ 表示并列于表 5 中。 $\lambda_w(s)$ 和 $\beta(s)$ 的关系可由下式对 p 两边求得

$$w = w_0 - \frac{1 + e_0}{G_s} \varepsilon_w \quad (1)$$

式中: e_0 , w_0 , G_s 和 ε_w 分别为试样的初始孔隙比、初始含水率、土粒的相对密度和水的体应变。



(a) ε_w - p 关系曲线



(b) w - p 关系曲线

图 8 相同吸力不同干湿循环次数试样的含水率和体应变与净平均应力之间的关系曲线

Fig.8 Relationship of net mean stress with moisture content and volumetric strain of same suction and different cycle times

由此得到 $\lambda_w(s)$ 和 $\beta(s)$ 的关系满足:

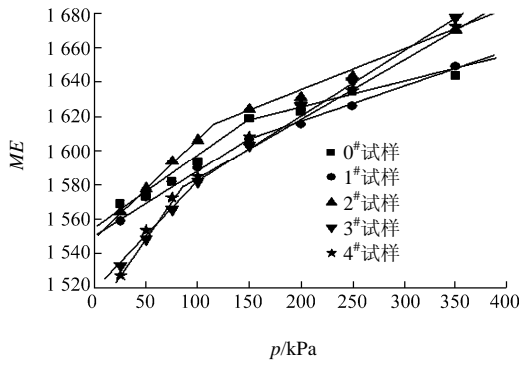
$$\lambda_w(s) = -\frac{G}{1 + e_0} \beta(s) \quad (2)$$

表 5 中 $\lambda_w(s)$ 和 $\beta(s)$ 关系也大体上符合式(2)之间的关系。从图 8(b)中可知相同吸力不同干湿循环次数的试样其含水率下降斜率不一致, 干湿循环次数越多, 含水率下降越快。

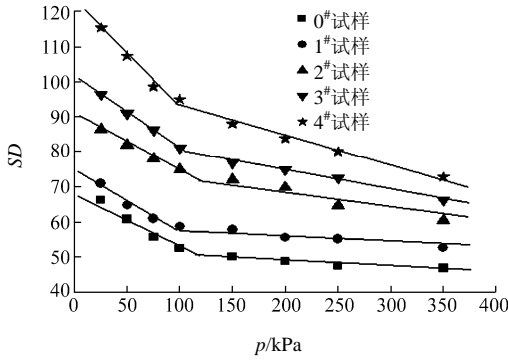
3.2.2 干湿循环对结构性变化的影响

图 9 为 0#~4# 试样吸力为 50 kPa 不同干湿循环次数 CT 扫描数据与净平均应力 P 之间的关系。由图可知干湿循环次数越多 CT 数 ME 越小, 方差 SD 越大。 ME - P 和 SD - P 曲线可以作为判断试样屈服应力点的另一种方法。由此确定的屈服应力值列于表 4。屈服点前后的 CT 扫描数据分别近似位于一条直线上, 据此可认为两直线的交点为试样的屈服应力点。

图 9 与陈正汉等^[13]中黄土屈服有所不同: 后者中原状 Q_3 黄土在屈服前, CT 数 ME 随着净平均应力的增长变化很小; 而屈服后 CT 数 ME 却迅速增加。本文中的裂隙膨胀土屈服前 CT 数 ME 迅速增



(a) ME-p 曲线



(b) SD-p 曲线

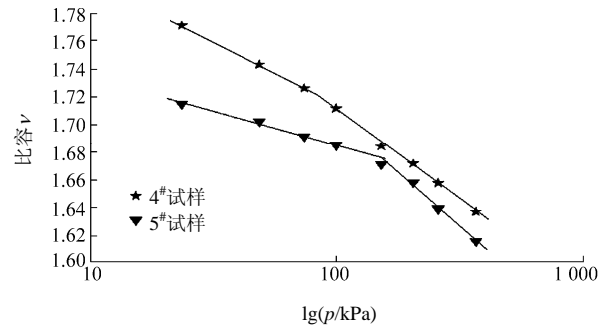
图9 相同吸力不同干湿循环次数试样扫描数据与净平均应力的关系

Fig.9 Relationship between scanning data and net mean stress with same suction and different cycle times

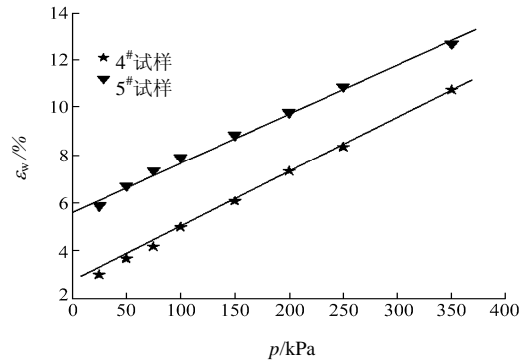
长、方差 SD 迅速下降；屈服点后 ME 的增长趋势以及 SD 的下降趋势均趋于平缓。这主要是因为干湿循环后的试样自身存在较多的裂隙和空洞，在较小的净平均应力作用下，裂隙和空洞会迅速闭合。陈正汉等^[13]中的 Q_3 黄土虽有不断裂隙和空洞，但自身的强度和结构性都较强，在试验初期能够起到暂时抵御外力的作用；而试验后期由于较大的净平均应力作用，试样发生屈服后，结构遭到了破坏，使得 CT 数迅速增长。

3.2.3 吸力对屈服应力、水量变化指标的影响

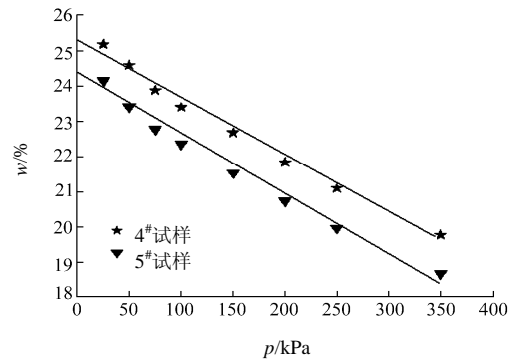
$5^\#$ 试样在干湿循环 4 次后进行吸力为 100 kPa 的试验，为了研究试样相同损伤程度不同吸力对屈服应力、水量变化等影响，故只将 $4^\#$ 试样与其进行对比。图 10 为这 2 个试样的 $\nu-\lg p$ ， ε_w-p 和 $w-p$ 关系曲线。图 10(a)中吸力为 100 kPa 的 $5^\#$ 试样屈服应力明显大于吸力为 50 kPa 的 $4^\#$ 试样，这与方祥位等^[14]的研究结果相同。本文中干湿循环次数相同可认为初始损伤相同，吸力越大，屈服应力越高。由图 10(a)确定的屈服应力列于表 4 中以及屈服前后直线段的斜率列于表 5 中。



(a) $\nu-\lg p$ 曲线



(b) ε_w-p 曲线



(c) w-p 曲线

图10 相同干湿循环次数不同吸力下的4#和5#试样关系曲线
Fig.10 Relationship curves of samples #4, #5 with same cycle times and different suctions

图 10(b), (c)与图 8 相似， ε_w-p 和 $w-p$ 的关系可用一条直线代替，但直线斜率差距不大(其值见表 5)，由于只做了一个干湿循环次数相同吸力不同的各向等压试验，准确定量两者之间的关系需要进一步的研究。

3.2.4 吸力对结构性变化的影响

$5^\#$ 和 $4^\#$ 试样都经历了 4 次干湿循环，但前者施加了 100 kPa 的吸力。由于施加了较大的吸力，这对试样的屈服应力和扫描数据产生很大的影响。

图 11 为相同干湿循环次数不同吸力下的 $4^\#$ 和 $5^\#$ 试样扫描数据与净平均应力的关系。从图 11 可知两试样屈服前后， $5^\#$ 试样的 ME 增长趋势和 SD 减小趋势要小于 $4^\#$ 试样。造成这种现象的原因在于：吸

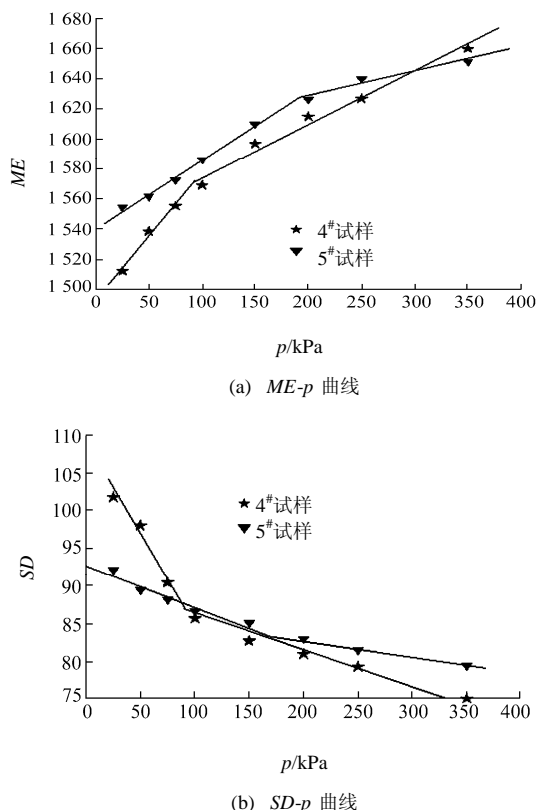


图 11 相同干湿循环次数不同吸力下的 4#和 5#试样扫描数据与净平均应力的关系

Fig.11 Relationship between scanning data and net mean stress with same cycle times and different suctions (#4, #5)

力的加大使得试样发生干缩, 密度提高, 而且较大的吸力使试样更难于压缩; 较小吸力作用下试样模量较小, 容易压缩。

由于本文中只做了一个吸力为 100 kPa 的试验, 相同干湿循环的试样不同吸力状态下的屈服应力的变化规律有待进一步深化。

4 损伤对屈服应力变化规律的探讨

前文通过 CT 扫描数据 ME 和 SD 与净平均应力 P 的关系曲线, 提出一种确定屈服应力的方法。各试样的屈服应力随干湿循环次数以及吸力变化的值列于表 4 中, 初步可认识到初始损伤以及吸力对屈服应力的影响: 随着干湿循环次数的增加, 屈服应力逐渐减小; 随着吸力的增加, 屈服应力迅速增大。本文中只做了 1 组干湿循环次数相同而吸力不同的压缩试验, 故屈服应力随着吸力和干湿循环次数的共同影响无法同时考虑到, 只能先研究损伤程度(相同吸力情况下)对试样屈服特性的影响。

表 4 中由 $v-lg p$, $ME-p$ 和 $SD-p$ 确定的屈服应

力相差并不是太大, 对三者确定的屈服应力做平均处理, 由此得出的平均值作为本次试验各试样的屈服应力值。

4.1 膨胀土结构性对其屈服的影响

土的结构性是对于土的联结和排列 2 个方面综合反映^[15]。CT 数 ME 反映了选定区域所有物质点的平均密度, ME 越大, 土越密实, 土颗粒之间的联结越强; CT 的方差 SD 反映物质点密度的不均匀程度, SD 值越小, 土颗粒排列分布越均匀。故采用 CT 数 ME 和方差 SD 就可以反映土的结构性。由于方差 SD 的敏感性, 故本文中反映结构性只采用 CT 数 ME 。

基于 CT 数 ME 定义干湿循环后的结构参数 m_c , 其值由下式确定:

$$m_c = \frac{ME - ME_i}{ME_i - ME_f} \tag{3}$$

对于干湿循环过程中的结构参数, 本文 0#试样没有进行干湿循环, 可认为是没有损伤的试样, 相应的 CT 数用 ME_i 表示, 其值为 1 553.32; 4#和 5#试样分别进行了 4 次干湿循环, 裂隙发育非常明显, 可认为是完全损伤试样, 相应的 CT 数 ME 用 ME_f 表示, 两者的平均值为 1 465.67, 但是由于试样损伤可继续发展, 故 ME_f 取为 1 440。式(3)中 ME 表示干湿循环过程中的任意时刻对应的 CT 数。如表 6 所示, 没有进行干湿循环的 0#试样结构性最强, 结构参数为 1; 随着损伤的加大试样初始结构性逐渐减小, 4 次干湿循环后结构性最差。

表 6 各试样结构参数值
Table 6 Structure parameters of every sample

试样编号	ME		m_c	m_p	m
	初始扫描	屈服扫描			
0#	1 553.32	1 614.32	1.00	0.57	1.57
1#	1 542.86	1 607.51	0.90	0.53	1.43
2#	1 532.36	1 597.79	0.81	0.47	1.28
3#	1 515.01	1 585.24	0.66	0.41	1.07
4#	1 473.15	1 568.13	0.30	0.35	0.65

注: m_p 为加载过程中的结构参数, $m = m_c + m_p$ 。

类似地, 用加载过程的 CT 数 ME , 定义加载过程中的结构参数 m_p :

$$m_p = \frac{ME - ME_i}{ME_f - ME_i} \tag{4}$$

由图 9(a)中可知, 4#试样第一次 ME 最小、最

后一次扫描 ME 最大, 两者可分别作为 ME_i 和 ME_f , 其值分别等于 1 540.22 和 1 677.67; 同时由于试样干湿循环仍能继续以及所受荷载可继续增大, 分别取 ME_i 和 ME_f 为 1 500, 1 700。式(4)中 ME 表示任意加载过程中对应的 CT 数, 其值也列于表 6。随着试样加载, 试样逐渐密实, 结构参数逐渐增大。

由于干湿循环对试样原有结构造成损伤; 随着荷载的施加, 原有结构逐渐消失, 新的结构逐渐形成, 势必又对结构产生影响, 所以认为结构参数 m 由干湿循环后的结构参数 m_c 和加载过程中的结构参数 m_p 两部分共同组成, 即

$$m = m_c + m_p \quad (5)$$

图 12 为 3 种方法确定的应力平均值, 作为某一特定时的非饱和土的屈服应力 p_0 (见表 4) 与结构参数 m (见表 6) 之间的关系曲线。可见随着干湿循环次数的增加结构参数呈递减趋势, 能较好地反映两者之间关系式为

$$p_0 = p_{0i} \exp(m - m_{0i}) \quad (6)$$

式中: p_{0i} 和 m_{0i} 分别为未经历干湿循环试样的屈服应力及其所对应的结构参数。式(6)表明屈服应力随着结构参数的增大而增大。

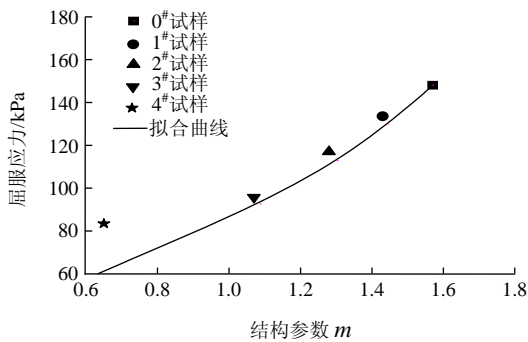


图 12 屈服应力与结构参数 m 之间的关系曲线

Fig.12 Curve of yielding stress with structure parameter m

A. Gens 和 E. E. Alonso^[2]提出的 Barcelona 膨胀土模型(BExM), LC 屈服面方程为

$$f(p, q, s) = q^2 - M^2(p + p_s)(p_0 - p) = 0 \quad (7)$$

其中,

$$p_s = ks \quad (8)$$

$$\frac{p_0}{p_c} = \left(\frac{p_0^*}{p_c} \right)^{\frac{\lambda(0)-k}{\lambda(s)-k}} \quad (9)$$

$$\lambda(s) = \lambda(0)[(1-r)\exp(-\beta s) + r] \quad (10)$$

式中: p_0 为某一特定值时的非饱和土的屈服应力; p_c 为参考应力; p_0^* 为饱和状态下的屈服净平均应力 (前固结压力); p_s 为某吸力下 CSL 线在 p 轴上的截距; k 为描述黏聚力随吸力增大的参数; M 为饱和条件下的临界状态线的斜率; $\lambda(s)$ 为某吸力下净平均应力加载屈服后的压缩指数, 当土饱和时, 等于 $\lambda(0)$; r 为同一土的最大刚度相关常数, $r = \lambda(s \rightarrow \infty) / \lambda(0)$; β 为控制土刚度随吸力增长速率的参数; s 为吸力; q 为偏应力。

本文中暂不考虑损伤对 SI 和 SD 屈服面的影响, 将式(6)代入式(7)中, 得到反映结构性对屈服影响的 LC 屈服面方程为

$$f_1(p, q, s) = q^2 - M^2(p + p_s)[p_{0i} \exp(m - m_{0i}) - p] \quad (11)$$

由式(11)可知, 随着结构性的减小, 屈服应力随之减小, LC 屈服面缩小; 随着结构性的增强, 屈服面扩展。

4.2 膨胀土结构损伤对屈服的影响

表 7 是试样各阶段的体应变值, 其中表示干湿循环后试样的累计体应变值 ϵ_{vc} 为

$$\epsilon_{vc} = \sum_{i=0}^n \epsilon_{vi} \quad (12)$$

式中: ϵ_{vi} 表示任意一次干湿循环后的体应变, 由表 1 数据求的; ϵ_{vp} 则是屈服应力点对应的体应变值 (见图 7), ϵ_v 为总体应变, 为干湿循环后的体应变与单独加载屈服时两者之和, 即

$$\epsilon_v = \epsilon_{vc} + \epsilon_{vp} \quad (13)$$

表 7 各试样体应变值

Table 7 Volumetric strain values of every sample

试样编号	ϵ_{vc}	ϵ_{vp}	ϵ_v
0#	0.000	0.042	0.042
1#	0.079	0.036	0.115
2#	0.127	0.042	0.169
3#	0.158	0.039	0.197
4#	0.167	0.050	0.217

图 13 为总的结构参数 m 与总体应变 ϵ_v 之间的关系曲线。从图中可知结构参数随着体应变的增加而减小, 可描述为

$$m = m_{0i} - \exp(a + b\epsilon_v) \quad (14)$$

式中: a, b 为土性参数, 本次试验分别等于 -4.99 和 21.73。

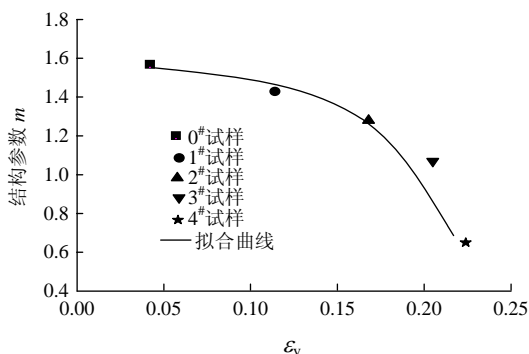


图 13 结构参数 m 与总体应变 ϵ_v 之间的关系曲线
Fig.13 Relationship of total volumetric strain ϵ_v with structure parameter m

将式(14)代入式(11), 即得考虑损伤的 LC 屈服面表达式:

$$f_1(p, q, s) \equiv$$

$$q^2 - M^2(p + p_s)\{p_{0i} \exp[-\exp(a + b\epsilon_v)] - p\} \quad (15)$$

以式(14)为桥梁, 式(15)把屈服应力与宏观体应变相联系, 为工程应用提供了方便。

由表 6, 7 可知, m 和 m_c , ϵ_v 和 ϵ_{vc} 有相似的变化规律, 为了简化结构损伤与屈服应力的关系, 直接将干湿循环后的结构参数 m_c 与屈服应力 p_0 联系起来。图 14 即为两者之间的关系曲线, 与图 12 相比, 两条曲线的形状相似。从而, 式(6)可简化为

$$p_0 = p_{0i} \exp(m_c - 1) \quad (16)$$

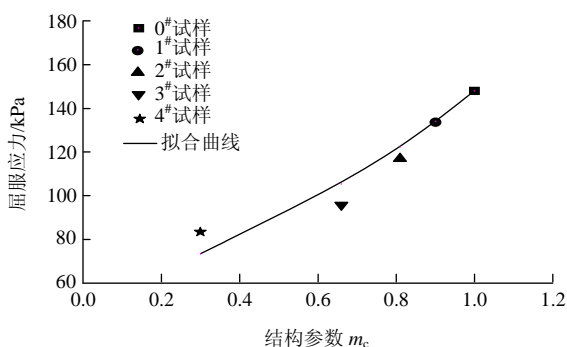


图 14 屈服应力与结构参数 m_c 之间的关系
Fig.14 Relationship of yielding stress with structure parameter m_c

相应地, 式(11)简化为

$$f_1(p, q, s) \equiv q^2 - M^2(p + p_s)[p_{0i} \exp(m_c - 1) - p] \quad (17)$$

同时可将干湿循环后的结构参数 m_c 与干湿循

环后的体应变 ϵ_{vc} 联系起来(见图 15), 两者之间的关系为

$$m_c = 1 - \exp(a + b\epsilon_{vc}) \quad (18)$$

其中, $a = -5.67$, $b = 29.68$ 。则式(11)可以简化为

$$f_1(p, q, s) \equiv$$

$$q^2 - M^2(p + p_s)\{p_{0i} \exp[-\exp(a + b\epsilon_{vc})] - p\} \quad (19)$$

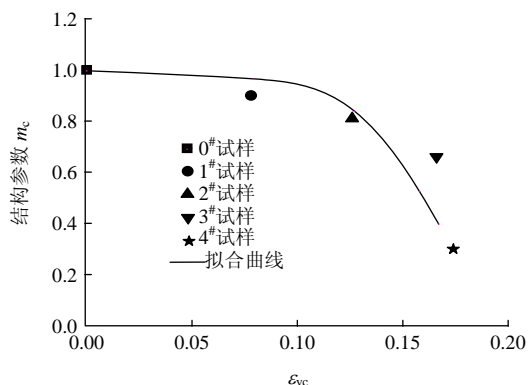


图 15 结构参数 m_c 与体应变 ϵ_{vc} 之间的关系
Fig.15 Relationship of volumetric strain ϵ_{vc} with structure parameter m_c

图 16 为屈服面损伤前后的空间形式, 可以看出屈服面随着损伤度的加大而减小^[16]。

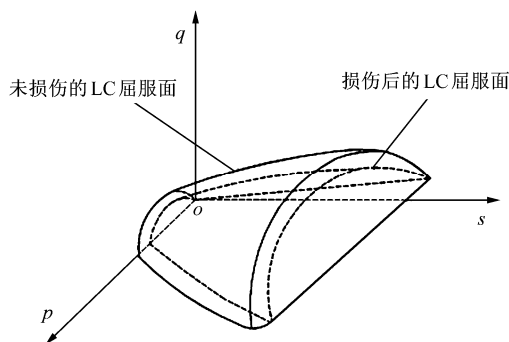


图 16 屈服面损伤前后的空间形式^[16]
Fig.16 Configuration of yielding surface fore-and-aft damage^[16]

5 结 论

- (1) 试样初始损伤程度越大, 屈服应力越小; 试样所受吸力越大, 屈服应力越大。
- (2) 试样屈服前的压缩指数随着损伤程度的增大逐渐增大, 而试样屈服后的压缩指数近似为一常数。
- (3) 根据 CT 三轴试验资料, 分别提出了细观结构参数与屈服应力和宏观体应变之间的定量表达

式,以细观结构参数为桥梁,将膨胀土 Barcelona 模型推广到结构损伤的情况。

参考文献(References):

- [1] ALONSO E E, GENS A, JOSA A. A constitutive model for partially saturated soils[J]. *Geotechnique*, 1990, 40(3): 405 - 430.
- [2] GENS A, ALONSO E E. A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays[J]. *Canadian Geotechnique Journal*, 1992, 29(6): 1 013 - 1 032.
- [3] WHEELER S J, SIVAKUMAR V. An elasto-plastic critical state framework for unsaturated soil[J]. *Geotechnique*, 1995, 45(1): 35 - 54.
- [4] MAATOUK A, LEROUEIL S, LA ROCHELLE P. Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil[J]. *Geotechnique*, 1995, 45(3): 465 - 477.
- [5] CUI Y J, DELAGE P. Yielding and plastic behaviour of unsaturated compacted silt[J]. *Geotechnique*, 1996, 46(2): 291 - 311.
- [6] 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))
- [7] 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.(in Chinese))
- [8] 卢再华, 李刚. 对膨胀土 G-A 弹塑性本构模型的探讨[J]. *后勤工程学院学报*, 2001, 17(2): 64 - 69.(LU Zaihua, LI Gang. Study of the G-A elasto-plastic constitutive model of expansive soil[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2001, 17(2): 64 - 69.(in Chinese))
- [9] 陈正汉, 卢再华, 蒲毅彬. 非饱和土三轴仪的 CT 机配套及其应用[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(4): 387 - 392.(CHEN Zhenghan, LU Zaihua, PU Yibin. The matching of computerized tomography with triaxial test apparatus for unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(4): 387 - 392.(in Chinese))
- [10] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 多功能土工三轴仪的研制及其应用[J]. *后勤工程学院学报*, 2007, 23(4): 1 - 5.(CHEN Zhenghan, SUN Shuguo, FANG Xiangwei, et al. Development and application of multi-function triaxial apparatus for soil[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2007, 23(4): 1 - 5.(in Chinese))
- [11] 姚志华, 陈正汉, 朱元青, 等. 膨胀土在湿干循环和三轴浸水过程中细观结构变化的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(1): 68 - 76.(YAO Zhihua, CHEN Zhenghan, ZHU Yuanqing, et al. Meso-structural change of remolded expansive soils during wetting-drying cycles and triaxial soaking tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(1): 68 - 76.(in Chinese))
- [12] DELAGE P, GRAHAM J. Mechanical behaviour of unsaturated soils: understanding the behavior of unsaturated soils requires reliable conceptual model[C]// *Proceedings of the 1st International Conference on Unsaturated Soils*. Paris: A. A. Balkema, 1995: 1 223 - 1 256.
- [13] 陈正汉, 方祥位, 朱元青, 等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(1): 1 - 11.(CHEN Zhenghan, FANG Xiangwei, ZHU Yuanqing, et al. Research on meso-structures and their evolution laws of expansive soil and loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 1 - 11.(in Chinese))
- [14] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 非饱和原状 Q_2 黄土屈服硬化过程的结构演化分析[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(7): 1 044 - 1 050.(FANG Xiangwei, CHEN Zhenghan, SHEN Chunni, et al. Analysis on mesostructure evolution of unsaturated natural Q_2 loess during yield hardening[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(7): 1 044 - 1 050.(in Chinese))
- [15] 谢定义, 齐吉琳. 土的结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. *岩土工程学报*, 1999, 21(6): 651 - 656.(XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, 21(6): 651 - 656.(in Chinese))
- [16] 姚志华. 裂隙膨胀土在三轴浸水和各向等压加载过程中的细观结构演化特性研究[硕士学位论文][D]. 重庆: 解放军后勤工程学院, 2009.(YAO Zhihua. Research on structural evolution of cracked expansive soil during triaxial soaking test and hydraustastic compressure test[M. S. Thesis][D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2009.(in Chinese))