

原状 Q_3 黄土在加载和湿陷过程中细观结构动态演化的 CT - 三轴试验研究

朱元青^{1, 2}, 陈正汉¹

(1. 后勤工程学院, 重庆 400041; 2. 广州军区工程科研设计所, 广东 广州 510515)

摘 要: 为了揭示原状 Q_3 黄土在加载和湿陷过程中的细观结构变化, 将湿陷三轴仪与医用 CT 机相配套, 进行了一系列控制吸力的 CT-三轴湿陷试验, 不仅得到了加载过程和湿陷过程中的宏观反应曲线, 而且得到了相对应的 CT 扫描图像。结果表明: 原状湿陷性黄土具有较强的初始结构性; 加载过程中, 较大的孔洞先扩展后闭合, 小孔洞逐渐闭合; 湿陷过程中, 大部分孔洞逐渐闭合且断面的密度分布趋于均匀; 湿陷过程中大孔洞闭合与否取决于浸水时的应力状态。通过宏细观试验资料的分析, 确定了原状湿陷性黄土的结构屈服应力, 提出了一个基于 CT 数均值的结构性参数, 分别定义了加载和湿陷过程中的结构损伤变量, 研究了它们的变化规律, 建立了结构损伤演化方程。

关键词: 原状湿陷性黄土; 湿陷三轴仪; CT 扫描; 细观结构; 结构性参数; 结构损伤变量; 结构损伤演化方程

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2009)08 - 1219 - 10

作者简介: 朱元青(1975 -), 女, 湖北松滋人, 博士, 主要从事非饱和土与岩土工程稳定性方面的研究。E-mail: zhuanyuanqing@163.com

(1. Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China; 2. Institute of Engineering Research and Design of Guangzhou Military Area, Guangzhou 510515, China)

Abstract: To disclose the variation of meso-structure of intact Q_3 loess during loading and collapse, a series of CT scanning-triaxial collapsible tests with controlled suction are done using triaxial apparatus for collapsible soils combined with computer tomography. Not only the macro response curves but also the corresponding images of CT scanning are obtained. It is indicated that the intact collapsible loess has apparent fabric; bigger holes expand, then close; smaller holes gradually close during loading; most of holes gradually close and the distribution of density of scanning section becomes homogeneous in the process of collapse; and whether the bigger holes close or not is decided by the stress condition of immersion. On the basis of analysis of macro and meso experimental materials, the yielding stress of fabric of the intact collapsible loess is determined, a structural parameter is developed based on the mean of CT values, structural damage variables in the process of loading and collapsing are individually defined, the changing law of variables is studied and equations of structural damage evolution are established.

Key words: intact collapsible loess; triaxial apparatus for collapsible soils; CT scanning; meso-structure; structure parameter; structural damage variable; equation of structural damage evolution

0 前 言

原状 Q_3 黄土是一种典型的非饱和土, 具有显著的物理特征和结构特征: 低含水率、低干密度、高孔隙率; 天然状态时基质吸力高、强度高、模量大; 受水浸湿时基质吸力丧失, 强度大减, 在力作用下产生湿陷, 引起较大的附加变形。为了研究吸力对湿陷变形

的影响, 国内外学者研制了新的仪器以进行控制吸力的湿陷试验^[1-7]。近年来, 为了研究原状黄土在加载过程和湿陷过程中细观结构的变化, 一些学者开始使用 CT 技术。蒲毅彬等^[8]首先用 CT 机结合简易压力室(刚

度小,不能测体变)对原状黄土在侧限压缩、三轴压缩、浸水及加荷-浸水过程中分别进行了扫描,观察了土样在各个试验过程中细观结构的变化特征。雷胜友等^[9]在三轴剪切和三轴湿陷过程中对 Q₃ 原状黄土试样进行了 CT 扫描,初步分析了应变软化、应变硬化及湿陷过程中黄土细观结构的变化机理。王朝阳等^[10]对 Q₃ 和 Q₂ 原状黄土各做了 1 个固结不排水剪切试验,同时进行 CT 扫描,发现黄土的结构损伤具有空间上的不均匀性。文献[8~10]中的三轴仪不能控制吸力,也不能精确量测浸水量和体变;试验中采用了过快的剪切速率(0.1~0.3 mm/min);而且各自的试验数量都很少,未能对黄土细观结构的损伤演化作深入细致的量化分析,更无法建立损伤演化规律。

本文将文献[7]中的湿陷三轴仪与医用 CT 机相配套,对 Q₃ 自重湿陷性原状黄土在加载和湿陷过程中进行了 CT 扫描试验,分析了加载过程和湿陷过程中黄土细观结构的演化特征,得出了相应的结构损伤演化规律。

1 试验仪器及试验概况

近年来,为了研究非饱和土与特殊土的结构性与其本构关系,后勤工程学院做了一系列工作,2000 年把非饱和土三轴仪与 CT 机结合^[11],2004 年研制了与 CT 机相匹配的专用土工三轴仪^[12],2006 年 6 月在陕西省汉中市建立了后勤工程学院 CT-三轴试验研究工作站^[13],如图 1 所示。

为了详细研究加载和湿陷过程中黄土细观结构的变化,笔者将自行研制的湿陷三轴仪与工作站的 CT 机及其它设备相结合。湿陷三轴仪的底座为二元结构,既可控制吸力,又可浸水;浸水时用 GDS 压力/体积控制器控制水头(水压力控制精度为 1 kPa)并精确量测浸水量(精度为 1 mm³);试样体变用精密体变量测装置量测,精度为 0.006 cm³。CT 机是陕西省南郑县医院的 prospeed AI 卧式螺旋扫描机,为 GE 公司生产,其空间分辨率为 0.38 mm,密度分辨率为 0.3%(3 H_u),CT 机的扫描参数:电压=120 kv,电流=165mA,时间=3 s,层厚=3 mm,重建矩阵为 512×512。配套后的仪器能够控制吸力、精确量测体变、精确量测浸水量、

动态无损地观测试样内部细观结构的变化。



图 1 后勤工程学院 CT-三轴试验研究工作站
Fig. 1 CT-triaxial experimental research workstation of Logistic Engineering University of PLA

试验所用土样取自宁夏固原扶贫扬黄灌溉工程 #11 泵站处,取土深度 10 m,为 Q₃ 自重湿陷性黄土。试样为采用切土盘精心削制的原状样。试样高 8 cm,直径为 3.91 cm。为了使试样具有相同的起始条件,用注射器缓慢将水滴入土样中,使试样的含水量统一为 11%。考虑不同加载条件的影响,共进行了 6 个浸水试验,各向等压浸水和偏压浸水试验各 3 个,浸水前试样的应力状态如表 1 所示。

为了加速浸水进程,在试样周围均匀放置了 6 条滤纸。对 #1 和 #2 试样,在浸水饱和后逐级增加偏应力,其值依次为 25, 50, 75, 100, 125, 150 和 200 kPa。#4 试样在各向等压条件下浸水至饱和。#3、#5、#6 试样固结结束后逐级增加偏应力至目标值后浸水;其中 #6 试样在浸入 1.151 g 水后,轴向变形迅速增加,偏应力下降,试样发生了湿剪破坏。浸水前,在初始状态、固结结束状态和每一级偏应力稳定状态,扫描试样的第 2 层和第 5 层,这两层的位置见图 2。浸水开始后,增加 4 层(即图 2 中的第 1、3、4、6 层),共扫描 6 层。根据湿陷体应变和浸水量的大小确定扫描时刻,采用跟踪扫描。扫描得到的 CT 图像上任意一个区域的 CT 数均值和方差(用符号 H 和 W 表示),分别反映该区域的平均密度和物质分布的均匀程度。

2 加载过程中宏细观反应

图 3 是 #3 试样剪切过程中偏应力与轴应变、净平

表 1 试样的初始物理参数和浸水前应力状态

Table 1 Initial physical parameters and stress states of samples before soaking

试样 编号	干密度 ρ_d /(g·cm ⁻³)	含水率 w/%	孔隙比 e	净围压 (σ_3-u_a)/kPa	基质吸力 s /kPa	偏应力 q /kPa	浸水时水头压力 /kPa
#1	1.31	11.0	1.08	100	150	0	4
#2	1.31	11.0	1.08	200	150	0	12
#3	1.32	11.0	1.04	100	150	200	14
#4	1.32	11.0	1.05	100	250	0	12
#5	1.31	11.0	1.06	100	150	100	14
#6	1.30	11.0	1.08	100	150	250	14

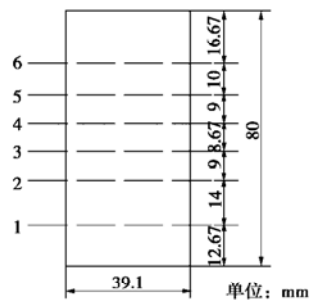


图 2 初始扫描位置图

Fig. 2 Initial scanning position

均应力与体应变的关系图, 可用两段折线拟合, 转折点的应力就是土结构的屈服应力。分别用 q_y 和 p_y 表示屈服偏应力和屈服净平均应力, 由图 3 可知, $q_y = 100 \text{ kPa}$, $p_y = 125 \text{ kPa}$ 。

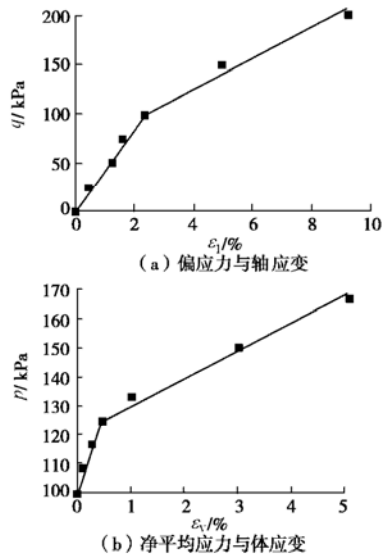


图 3 #3 试样剪切过程中应力与应变的关系

Fig. 3 Stress-strain curves during shearing of the third sample

剪切过程中对#3 试样的第 2 层和第 5 层进行 CT 扫描, 相应的数据见表 2。将每一层的 CT 数均值与净平均应力、偏应力的关系绘于图 4 中, 每一层的数据点亦可用两段折线拟合。当应力不超过转折点对应的应力值时, CT 数均值基本不变; 当应力超过转折点对应的应力值后, CT 数均值随应力的增加急剧增大。第 2 层和第 5 层的 CT 数均值变化转折点对应的偏应力分别为 75 kPa 和 100 kPa。取这两层 CT 数均值变化转折点对应的净平均应力的平均值为结构屈服净平均应力, 其大小为 129 kPa。

图 5 为#3 试样的 CT 数均值与体应变和偏应变的关系图, 当体应变和偏应变分别小于 0.45% 和 1.45% 时, CT 数均值基本不变; 当体应变和偏应变继续增加时, 试样的 CT 数均值增大。图 5 中转折点对应的净平均应力为 125 kPa。这与图 3, 4 中确定的结构屈服净平均应力很接近。可见, CT 数能反映土结构的

变化, 为分析土的宏观力学性质提供依据。

表 2 #3 试样在各级偏应力下的 CT 扫描状态及数据

Table 2 CT scanning status and CT data of the third sample at different distortional stresses					
试样 状态	扫描 次序	第 2 层		第 5 层	
		H	W	H	W
初始	a	863.29	67.57	821.10	49.40
固结结束	b	895.38	63.02	854.66	44.75
$q=25 \text{ kPa}$	c	896.54	63.92	856.54	44.74
$q=50 \text{ kPa}$	d	888.94	67.31	852.75	41.40
$q=75 \text{ kPa}$	e	896.89	62.28	854.11	42.59
$q=100 \text{ kPa}$	f	905.68	60.99	854.01	41.70
$q=150 \text{ kPa}$	g	932.64	57.94	887.05	45.91
$q=200 \text{ kPa}$	h	969.47	50.36	927.18	43.42

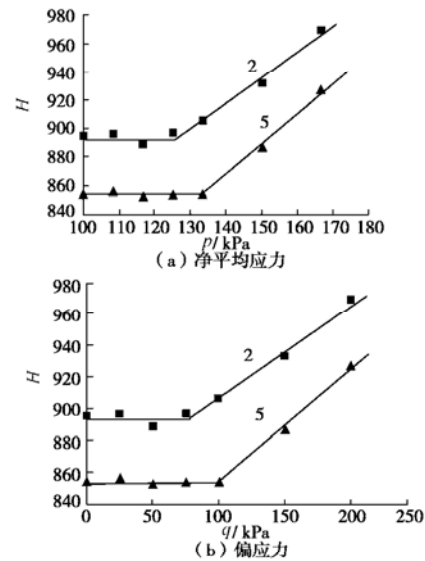


图 4 #3 试样剪切过程中各层 CT 数均值与应力的关系

Fig. 4 Mean of CT values versus stress of the third sample during shearing

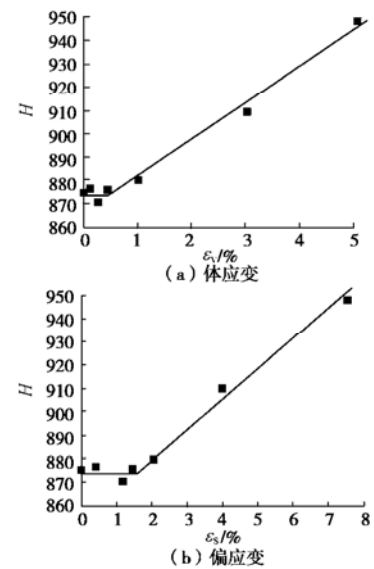


图 5 #3 试样剪切过程试样 CT 数均值与应变的关系

Fig. 5 Mean of CT values versus strain during shearing of the third sample

3 湿陷过程的宏观反应

湿陷过程中, 湿陷体应变和含水率随时间变化曲线的特征以#3 和#4 试样为例进行说明。图 6, 7 分别为试样湿陷体应变和含水率的历时曲线。两者的历时曲线均可划分为 3 个阶段, 但前者历时曲线的 3 个阶段的分界点与后者历时曲线的分界点对应的时间不同。含水率历时曲线的第 2 个分界点对应的时间比湿陷体应变历时曲线的相对应的时间要早, 表明当试样的含水率近乎不变(近乎饱和)时, 在荷载作用下, 试样仍在产生湿陷变形。湿陷体应变历时曲线中, 第一阶段中试样原有结构发生破坏的同时被压密, 湿陷体应变增加较快; 第二阶段试样压密后可产生湿陷变形的孔隙体积减小, 湿陷体应变增加减缓; 第三阶段试样原有结构已基本破坏, 压密变形也趋于停止, 湿陷体应变增加更加缓慢, 近乎水平。

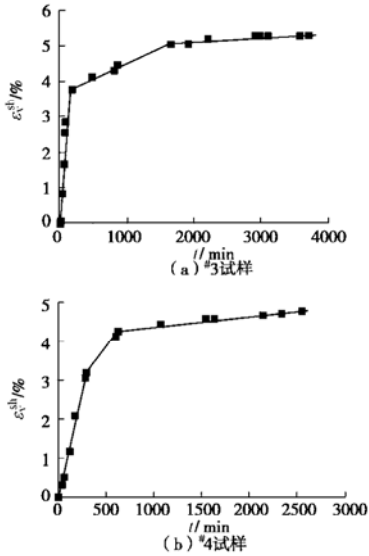


图 6 湿陷体应变与时间的关系
Fig. 6 Collapsible volumetric strain versus time

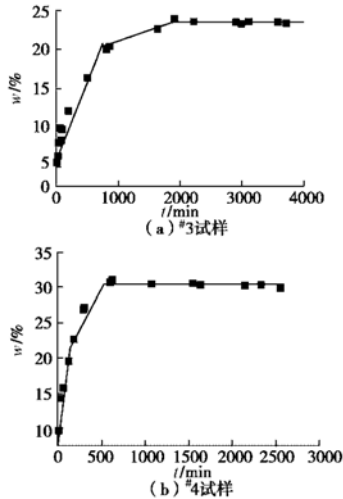


图 7 试样含水率与时间的关系
Fig. 7 Water content versus time

图 8 是#3 和#4 试样的 CT 数均值与湿陷体应变的关系曲线。#3 试样的曲线可划分为三个阶段, 且第二段的斜率比第一段大; 而#4 试样曲线可分为两段, 且第二段的斜率比第一段小。这是因为#4 试样仅受 100 kPa 净平均应力的作用, 而#3 试样不仅有 167 kPa 的净平均应力作用, 还有 200 kPa 偏应力的作用, 偏应力加速了土粒在湿陷过程中的运动。

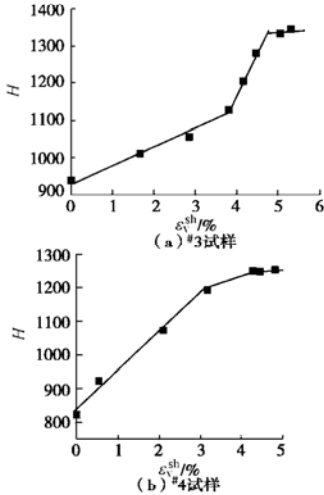


图 8 试样 CT 数均值与湿陷体应变的关系
Fig. 8 Mean of CT values and collapsible volumetric strain

4 CT 图像分析

本次研究对 6 个试样在试验过程中进行扫描, 共取得 273 幅 CT 图片。CT 图像可直观地显示试样断面上孔隙、孔洞、裂纹等低密度区(表现为暗黑色)以及土颗粒和胶结物比较集中的高密度区(表现为亮白色)。

4.1 加载过程中 CT 扫描图像分析

图 9, 10 分别为#3 试样第 2 层和第 5 层在各级偏应力下(应力控制)的 CT 扫描图像。这两层的扫描状态和 CT 数据如表 2 所示。图中的“2a”, 前面的“2”表示第 2 层; 后面的“a”表示扫描对应的试样状态, 与表 2 中的“扫描次序”相对应, 其余的图片编号方法类推。

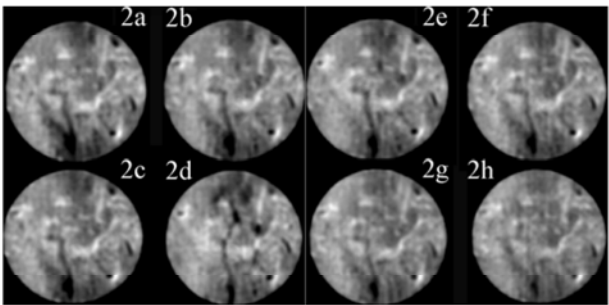


图 9 #3 试样第 2 层在各级偏应力下的 CT 图像
Fig. 9 Images of CT scanning of the second layer of the third sample at different distortional stresses

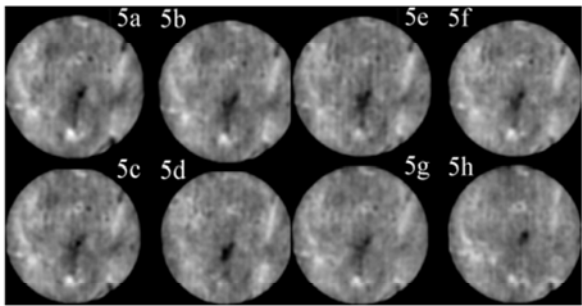


图 10 #3 试样第 5 层在各级偏应力下的 CT 图像

Fig. 10 Images of CT scanning of the fifth layer of the third sample at different distortional stresses

“2a”、“5a”对应的图像上存在孔洞较多的低密度区及土颗粒和胶结物较集中的高密度区，两个断面的 CT 数均值分别为 $863.29 H_u$ 和 $821.1 H_u$ ，表明两个断面密度相差较大，试样具有初始不均质性。固结后，两个断面的 CT 数均值增大，方差减小，但因净固结压力小于试样的结构屈服应力，因而从 CT 图像上看土样的结构基本没有变化。偏应力为 25 kPa 时，图像无明显变化。偏应力为 50 kPa 时，第 2 层中的孔洞（低密区）增多，个别低密区贯通，形成裂隙；第 5 层 CT 图像上孔洞（低密区）面积略有减小，表明试样的结构演化具有不均匀性。偏应力为 75 kPa 时，第 2 层裂隙部分闭合，2e 的图像特征与 2c 相比差别很小；第 5 层的低密区面积略有增加。表明当偏应力不超过 75 kPa 时，试样的变形为弹性变形。此后随着偏应力增大，第 2 层和第 5 层的孔洞逐渐闭合。

应当指出，尽管#3 试样的第 2 层在 50 kPa 偏应力作用下形成个别裂隙，但由于每层扫描厚度只有 3 mm，个别裂隙并未在试样纵向贯通，因而未引起试样结构的实质性变化，这一点可从表 2 和图 4 得到证实。

4.2 湿陷过程中 CT 扫描图像分析

表 3 是#1 试样扫描时对应的试样状态及其第 1 层的 CT 扫描数据。饱和后剪切至每级偏应力下的应变值均以固结结束状态作为参考状态计算，为剪切应变

与湿陷应变之和。由表 3 可知，湿陷过程中第 1 层的 CT 数均值逐渐增大，方差逐渐减小。

图 11 是#1 试样第 1 层在湿陷过程中的 CT 图像。用 Osiris 软件测得图 11 中 1b 上的大孔洞长度为 26.9 mm。在 100 kPa 净围压下浸水时，整个试样从浸水开始就有湿陷变形产生，但 CT 扫描图像从 1b 依次到 1f，大孔洞面积无明显减小；从 1f 到 1g，大孔洞的面积有所增加；从 1g 到 1h，孔洞面积基本不变。表明湿陷过程中孔洞的密度分布存在调整现象。浸水结束时，孔洞部分的密度与周围土颗粒点的密度差异有所减小，这是因为孔洞的空气被水取代，孔洞部分的密度增加。随着浸水的进行，密度较高的部分与周围部分差异变小。1b 中两个尺寸较小的孔洞随着浸水的进行闭合了。

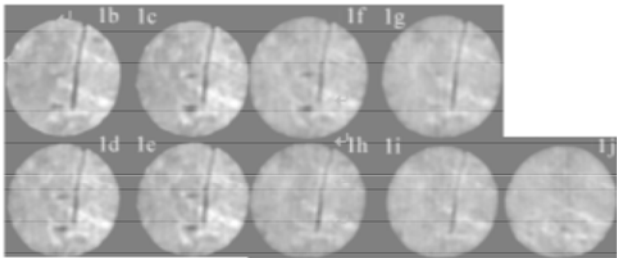


图 11 #1 试样第 1 层在湿陷过程中的 CT 图像

Fig. 11 Images of CT scanning of the first layer of the first sample during collapse

饱和后，当偏应力增加至 50 kPa 时（图像 1i），大孔洞形状无明显变化，但孔洞区域的灰度略有增加。表明在偏应力的作用下，孔壁上有部分土颗粒迁移到了孔洞中；试样体应变和偏应变相对湿陷结束时增幅较小，分别为 1.3%和 2.1%。当偏应力增大至 200 kPa 时（图像 1j），大孔洞孔壁的联结被破坏，更多的土颗粒产生滑移，进入孔洞中，土颗粒逐渐充满了孔洞，孔洞消失，试样的体应变和偏应变增幅大。此时体应变和偏应变相对湿陷结束时增幅分别为 7.9%和 14.2%。

表 3 #1 试样扫描状态及其第 1 层 CT 扫描数据

Table 3 CT scanning status and CT data of the first sample

试样状态	扫描次序	体应变 $\varepsilon_v/\%$	偏应变 $\varepsilon_p/\%$	含水率 $w/\%$	第 1 层	
					H	W
初始	a	0.0	0.0	11.00		
固结结束	b	1.0	0.0	10.03	825.72	68.40
浸水 5.275 g	c	0.4	0.0	14.20	973.76	66.07
浸水 10.005 g	d	0.8	0.0	18.00	1032.04	60.27
浸水 15.117 g	e	1.7	0.0	22.10	1068.92	59.11
浸水 21.171 g	f	3.1	0.0	26.90	1196.73	46.38
浸水 25.753 g	g	3.9	0.0	30.50	1230.86	44.94
浸水 26.645 g	h	4.3	0.0	31.20	1240.71	42.65
$q=50$ kPa	i	5.6	2.1		1262.22	38.43
$q=200$ kPa	j	12.2	14.2		1374.33	33.98

为了分析浸水过程中特殊区域 CT 数均值的变化特征,用 Osiris 软件选取特殊区域进行分析。图 12 为^{#1}试样第 1 层上选取的特殊区域形状图(图 11 中 1b 上选取)。3 个特殊区域分别是直径为 36.8 mm 的圆,称为全局区域;包含孔洞的曲边多边形,称为孔洞区域,面积为 20 mm²;包含土粒和胶结物较多的多边形区域,称为高密度区,面积为 23 mm²。

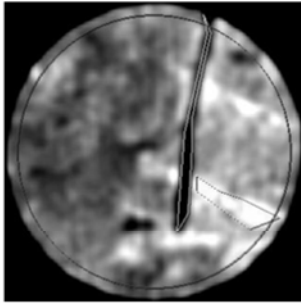


图 12 ^{#1}试样第 1 层特殊区域形状图

Fig. 12 The figure of shape of the special region of the first layer of the first sample

3 个区域的 CT 数均值在湿陷过程中的演化规律见图 13,横坐标的“扫描次数”与表 4 中的“扫描次序”相对应,例如,次数“2”与次序“b”相对应。3 个区域的 CT 数均值随湿陷的进行均增大。湿陷开始至结束,孔洞区域的 CT 数均值增量最大,为 493.79 H_u ;全局区域的 CT 数均值增量居中,为 419.32 H_u ;高密度区域的 CT 数均值增量最小,为 362.34 H_u 。这表明高密度区域的密度比孔洞区域的密度增加得少。湿陷开始时,高密度区域与孔洞区域的 CT 数均值之差为 281.35 H_u ;湿陷结束时,这两个区域的 CT 数均值之差为 149.9 H_u ,表明断面上各个区域的 CT 数均值差异随湿陷进行逐渐减小,断面的密度分布越来越均匀。

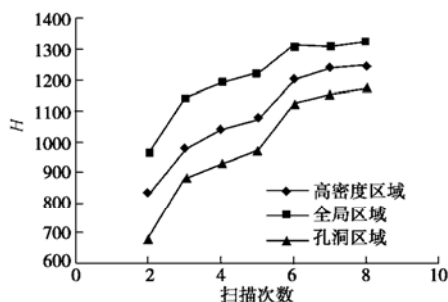


图 13 ^{#1}试样特殊区域 CT 数均值的演化规律

Fig. 13 Evolutionary law of mean of CT data of special region in the first sample

图 14 为^{#2}试样第 3 层在湿陷过程中的 CT 图像,浸水前(3b)的孔洞长度为 19.6 mm。随着浸水进行,大孔洞的面积逐渐减小。浸水结束时,大孔洞的轮廓仍然可见,但大孔洞的密度与周围土颗粒的密度差异

显著减小。随着孔壁胶结物的溶解,孔洞周围的土颗粒进入孔洞中,但浸水压力不能将进入孔洞后的土颗粒压密,因而大孔洞的轮廓仍然可见。浸水饱和后剪切至偏应力为 50 kPa (3h) 时,图 14 中大孔洞的形状面积以及它和周围土颗粒点的密度差异,与浸水结束时(3g)相比,从肉眼观察,无明显变化(图 14 中 3g 到 3h)。当偏应力为 125 kPa (3i) 时,大孔洞消失了。因此,可以认为,大孔洞在浸水过程中的变形分为 3 步:首先水渗入孔中,孔壁的胶结物溶解软化;若应力足够大,能破坏软化后的胶结物强度,孔壁周围的土颗粒则在力的作用下进入孔中;最后孔洞中的土颗粒进一步被压密。

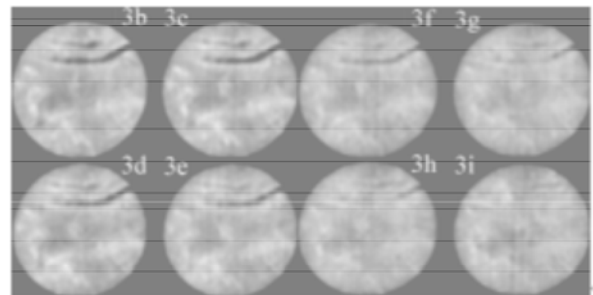


图 14 ^{#2}试样第 3 层在湿陷过程中的 CT 图像

Fig. 14 Images of CT scanning of the third layer of the second sample during collapse

图 15, 16 分别为^{#3}试样第 2 层、第 3 层在湿陷过程中的 CT 扫描图像。第 2 层中的孔洞随着湿陷的进行逐渐闭合了。量测图 16 中 3h 的大孔洞尺寸,长度为 22.9 mm,孔径为 4.4 mm;边缘处圆形孔洞的直径为 2.9 mm。随着湿陷的进行,从 3h 到 3j,大孔洞逐渐闭合了;随着湿陷的进一步发展,从 3j 到 3k,孔洞增大了;但接着大孔洞又逐渐闭合。湿陷结束时,大孔洞面积较湿陷开始时已显著变小,但边缘处的圆形孔洞变化不明显。

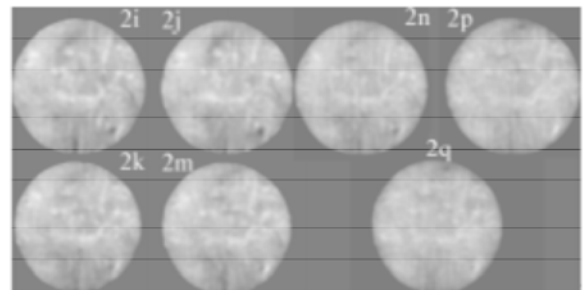


图 15 ^{#3}试样第 2 层在湿陷过程中的 CT 图像

Fig. 15 Images of CT scanning of the second layer of the third sample during collapse

综合图 11, 14, 16 可知,浸水过程中大孔洞的面积是否减小,与应力状态有关。浸水使得孔壁周围的

胶结物软化, 软化后, 若应力足以破坏软化后的胶结物强度, 则土颗粒滑移到孔洞中, 孔洞面积随浸水进行减小; 若应力不足以破坏软化后的孔壁胶结物强度, 则浸水过程中孔洞面积基本不变。

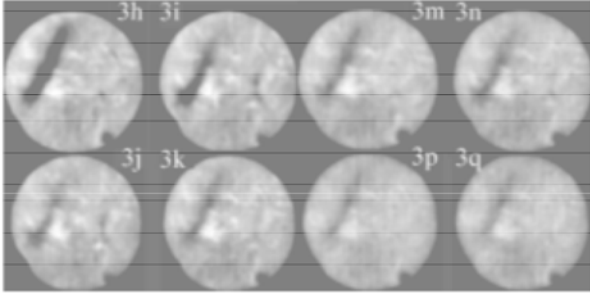


图 16 #3 试样第 3 层在湿陷过程中的 CT 图像

Fig. 16 Images of CT scanning of the third layer of the third sample during collapse

图 17 为 #4 试样第 2 层在各向等压条件下浸水的 CT 图像, 大部分孔洞在浸水过程中逐渐闭合。浸水至饱和时, 断面上仍有部分孔洞存在 (低密区)。随着浸水的进行, 断面的灰度越来越均匀。

限于篇幅, 本文仅列出 #1~#4 试样 4 个原状样部分断面的扫描图像, 试验试样的其它断面也表现出类似的细观结构演化规律, 详见文献[14]。

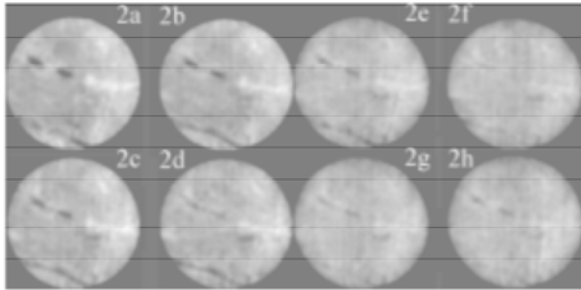


图 17 #4 试样湿陷过程中第 2 层 CT 图像

Fig. 17 Images of CT scanning of the second layer of the fourth sample during collapse

5 结构性参数及结构损伤演化规律

关于黄土的结构性及其定量化描述, 国内一些学者分别从微观和土力学角度进行了有意义的研究^[15-17]。本文以细观试验资料为基础提出了一个描述原状黄土结构性参数的新方法。

由于某一体素的 CT 数是密度和含水率的函数, 而不同的密度和含水率及其组合反映了该体素的不同结构性状态。从某一天然黄土场地选取一组土样, 将较完整的黄土土样视为结构性没有损伤的土样, 其相应的 CT 数均值用 H_i 表示; 饱和后剪切至原有结构完全破坏的黄土土样视为结构性完全损伤 (无结构强度)

的土, 其 CT 数均值用 H_f 表示。则某一黄土土样的基于 CT 数均值的结构性参数定义为

$$m_i = \frac{H_f - H}{H_f - H_i}, \quad (1)$$

式中, H 为试样在某一时刻的各层 CT 数均值的平均值。当试样原有结构没有损伤时, $H = H_i$, $m_i = 1$; 当试样原有结构完全破坏时, $H = H_f$, $m_i = 0$ 。

湿陷前的结构性损伤变量定义为

$$D_1 = \frac{m_{1c} - m_{1\sigma}}{m_{1o}}, \quad (2)$$

式中, m_{1c} 为结构开始损伤时的结构性参数, $m_{1\sigma}$ 为加荷稳定后的结构性参数, m_{1o} 为试样的初始结构性参数。

图 18 是 #3 试样结构损伤变量 D_1 与试样体应变和偏应变 (扣除损伤开始时的相应应变值) 的关系; 将剪切过程中结构损伤变量视为试样体应变和偏应变的二元函数, 进行二元线性回归, 确定 $A_1 = 1.33$, $A_2 = 1.27$ 。

$$D_1 = A_1 \langle \varepsilon_v - \varepsilon_{vc} \rangle + A_2 \langle \varepsilon_s - \varepsilon_{sc} \rangle, \quad (3)$$

式中, $\langle \rangle$ 是开关函数,

$$\langle \varepsilon_v - \varepsilon_{vc} \rangle = \begin{cases} 0 & (\varepsilon_v \leq \varepsilon_{vc}) \\ \varepsilon_v - \varepsilon_{vc} & (\varepsilon_v > \varepsilon_{vc}) \end{cases}, \quad (4)$$

$$\langle \varepsilon_s - \varepsilon_{sc} \rangle = \begin{cases} 0 & (\varepsilon_s \leq \varepsilon_{sc}) \\ \varepsilon_s - \varepsilon_{sc} & (\varepsilon_s > \varepsilon_{sc}) \end{cases}, \quad (5)$$

其中, ε_{vc} 和 ε_{sc} 分别是土的结构性开始产生明显损伤时的体应变和偏应变阈值, A_1 和 A_2 是土性参数。

根据图 5, $\varepsilon_{vc} = 0.019$ (图中的体应变阈值与固结时的体应变之和, 固结体应变为 1.4%), $\varepsilon_{sc} = 0.014$ 。

湿陷变形的计算是以加荷稳定后浸水产生的附加变形除以试样初始状态时的体积 (高度) 获得的。类似地, 定义湿陷过程中的结构损伤变量为

$$D_2 = \frac{m_{1\sigma} - m_{1\sigma w}}{m_{1o}}, \quad (6)$$

式中, $m_{1\sigma w}$ 为试样在湿陷过程中任意时刻的结构性参数, $m_{1\sigma}$ 和 m_{1o} 的定义同前。

把式 (2) 和式 (4) 相加, 得

$$D = D_1 + D_2 = \frac{m_{1c} - m_{1\sigma w}}{m_{1o}}, \quad (7)$$

式中, D 为总的结构损伤变量, $0 < D \leq 1$ 。当 D_1 越大时, D_2 越小; 即加载造成的结构损伤越大, 则湿陷造成的结构损伤越小。反之, 若加载引起的损伤较小, 则湿陷造成的结构损伤越大。

图 19 为 #1~#5 试样湿陷过程中结构损伤变量与湿陷体应变 (用 ε_v^{sh} 表示) 的关系。结构损伤变量随着湿陷体应变的增加而增加, 增加速率大体上是先快后

慢。湿陷初期阶段，由于胶结物溶解和孔隙塌陷产生湿陷变形，因此，此阶段结构损伤快；湿陷后期，湿陷变形主要为压密变形，结构损伤渐趋终止。

图 20 为#3 和#5 试样湿陷过程中结构损伤变量与湿陷偏应变（用 ε_s^{sh} 表示）的关系，结构损伤变量随着湿陷偏应变的增加而增加，增加速率是先慢后快。这是由于湿陷偏应变是由于颗粒滑移造成的，湿陷初期，结构损伤的主要方面表现胶结物溶解和孔隙塌陷，颗粒滑移造成的结构性损伤不明显；湿陷后期，体应变

基本稳定，土样在偏应力作用下的变形以偏应变为主，因而颗粒滑移引起的结构损伤占主导地位，此时，结构损伤对偏应变增加敏感。

图 21 表示试样在湿陷过程中结构损伤变量与归一化体积含水率的关系，归一化体积含水率用 $\frac{\theta - \theta_\sigma}{\theta_s - \theta_\sigma}$ 表示， θ_s 为试样饱和时的体积含水率， θ_σ 为试样在湿陷前的试验过程中控制的吸力值对应的体积含水率。

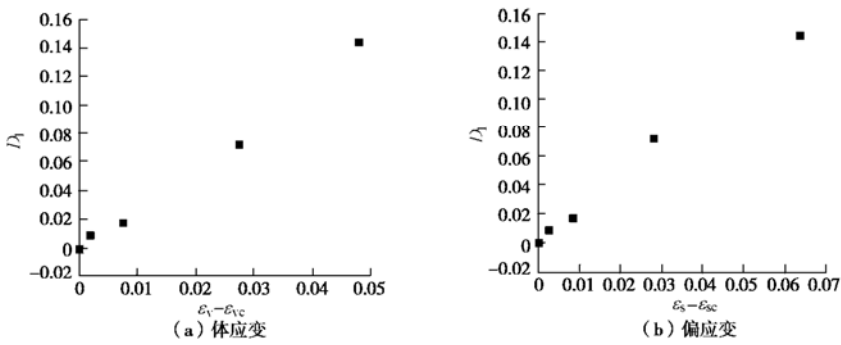


图 18 #3 试样剪切过程中结构损伤变量 D_1 与应变的关系

Fig. 18 Structural damage variable D_1 versus strain of the third sample during shearing

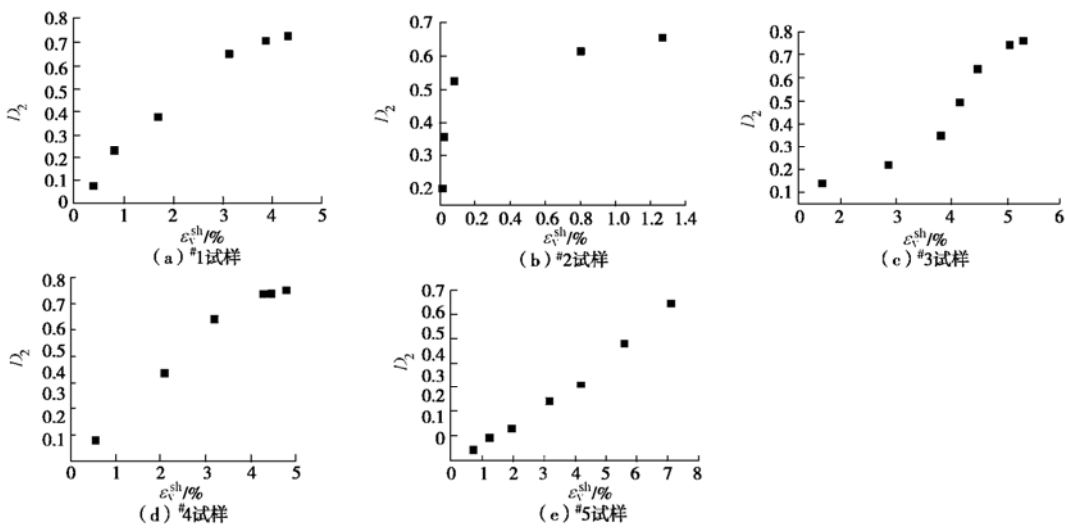


图 19 试样在湿陷过程中结构损伤变量与湿陷体应变的关系

Fig. 19 Structural damage variable versus collapsible volumetric strain of sample during collapse

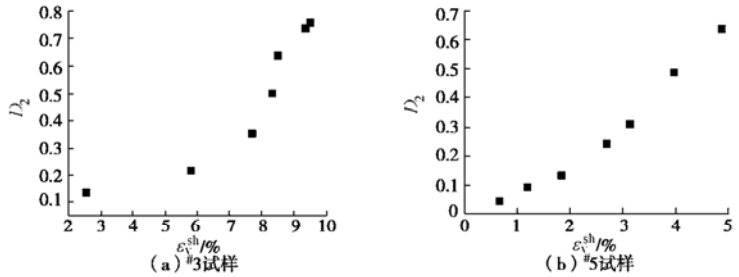


图 20 试样在湿陷过程中结构损伤变量与湿陷偏应变的关系

Fig. 20 Structural damage variable versus collapsible distortional strain during collapse

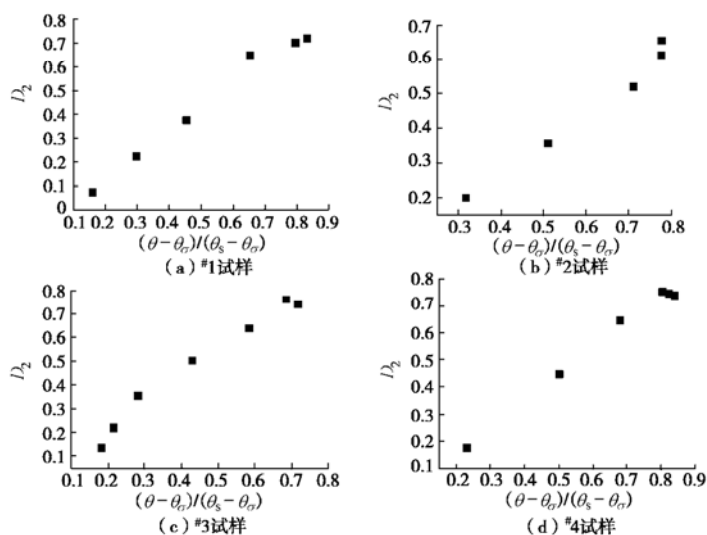


图 21 试样在湿陷过程中结构损伤变量与归一化体积含水率的关系

Fig. 21 Structural damage variable versus normalized volumetric water content during collapse of samples

由图 21 可见,结构损伤变量随试样归一化体积含水率的增加而增加,图 21 (a)、(c) 和 (d) 中的增加速率是先快后慢,图 21 (b) 为线性增加。

由以上分析可知,结构损伤变量随着湿陷体应变、湿陷偏应变增加逐渐增加,并逐渐趋向于一个常数。除#2 试样外,结构损伤变量随归一化体积含水率增加逐渐增加,并逐渐趋近于一个常数。将结构损伤变量视为湿陷体应变、湿陷偏应变和归一化体积含水率的函数,用 MATLAB 程序提供的拟合函数进行非线性拟合,发现以下函数表达式的拟合效果较好:

$$D_2 = 1 - \exp \left[- \left(A_3 \varepsilon_v^{sh} + A_4 \varepsilon_s^{sh} + A_5 \right) \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right] \quad (8)$$

对于#1~#5 试样采用多元回归计算 $A_3 \sim A_5$, 计算结果如表 4 所示。式 (6) 表明,湿陷过程中,结构损伤变量随湿陷体应变、湿陷偏应变和归一化体积含水率的增加呈衰减型指数规律增加。为了简化模型,假设 $A_3 \sim A_5$ 为常数。由于#5 试样尚未达到完全饱和,取 $A_3 \sim A_5$ 为#1~#4 试样回归模型对应系数的平均值,可得: $A_3 = 27.96$, $A_4 = 3.07$, $A_5 = 0.63$ 。

表 4 试样浸水前的应力状态与拟合系数的关系

Table 4 The relationship between stress states before immersion and fitting coefficients						
试样 编号	净平均 应力 p/kPa	偏应力 q/kPa	基质 吸力 s/kPa	A_3	A_4	A_5
#1	100.00	0	150	24.82		0.62
#2	200.00	0	150	39.34		0.89
#3	166.67	200	150	27.29	3.07	0.24
#4	100.00	0	250	20.38		0.76
#5	133.33	100	150	2.75	2.74	1.61

6 结 论

通过对原状黄土固结过程、剪切过程和湿陷过程

进行 CT 扫描试验研究,得到了湿陷体应变和试样含水率的历时曲线、剪切和湿陷过程中的 CT 图像以及试样各个断面的 CT 数均值和方差的数据。研究结果表明:

(1) 原状黄土具有较强的初始结构性,扫描断面上有土颗粒和胶结物比较集中的高密度区和孔洞发育的低密度区。

(2) 加载过程中,较大的孔洞先扩展后闭合;小孔洞逐渐闭合。当净平均应力不超过结构屈服净平均应力时,原状黄土的结构处于调整阶段,变形为弹性变形,试样的 CT 数均值基本不变;当净平均应力大于结构屈服净平均应力后,原状黄土产生塑性变形,试样的 CT 数均值增大。本文所研究的黄土在吸力为 100 kPa 时结构屈服净平均应力为 129 kPa。

(3) 湿陷体应变和含水率的历时曲线可分为三段。第一阶段试样原有结构发生破坏同时被压密,湿陷体应变增加较快;第二阶段湿陷体应变增加减缓;第三阶段试样结构已完全破坏,压密变形也趋于停止,湿陷体应变增加更加缓慢。

(4) 湿陷过程中,大部分孔洞逐渐闭合;部分孔洞出现了先闭合后扩展再逐渐闭合的现象;浸水至饱和时仍有孔洞存在;断面的灰度分布越来越均匀;CT 数均值逐渐增大,方差逐渐减小;大孔洞闭合与否取决于浸水时的应力状态。

(5) 提出了一个基于 CT 数均值的结构性参数,分别定义了加载和湿陷过程中的结构损伤变量。分析了这两个结构损伤变量的变化特征,建立了相应的演化方程。研究发现:结构损伤变量在剪切过程中随体应变和偏应变的增加线性增加;在湿陷过程中随湿陷体应变、湿陷偏应变和归一化体积含水率的增加呈衰减型指数规律增加。

利用本文提出的结构损伤演化方程,可以建立湿陷性黄土的结构性本构模型,有关工作将另文讨论。

参考文献:

- [1] 李章泌. 非饱和压实黄土的压缩与湿陷特性[C]// 中加非饱和土学术讨论会, 武汉, 1994: 220 - 227. (LI Zhang-mi. Compression and collapse of compacted unsaturated loess[C]// Sino-Canada Symposium on Unsaturated Soils, Wuhan, 1994: 220 - 227. (in Chinese))
- [2] HABIBAGAH G, MOKHBERI M. A hyperbolic model for volume change behavior of collapsible soils[J]. Can Geotech J, 1998, **35**: 264 - 272.
- [3] BAREERA M, ROMERO E, LLORET A, et al. Collapse tests on isotropic and anisotropic compacted soils[C]// Proc of an Int Workshop on Unsaturated Soils Trento, 2000: 33 - 46.
- [4] BRAEERA M, ROMERO E, LLORET A, VAUNAT J. Hydro-mechanical behaviour of a clayer silt during controlled-suction shearing[C]// Proc of 3rd Int Conf on Unsaturated Soils, 2002: 485 - 490.
- [5] PEREIRA J H F, FREDLUND D G. Volume change behavior of collapsible compacted gneiss soil[J]. J Geotech Geoenviron Eng, 2000, **126**(10): 907 - 916.
- [6] MEILANI I, RAHARDJO H, LEONG E. Pore-water pressure and water volume of an unsaturated soil under infiltration conditions[J]. Can Geotech J, 2005, **42**: 1509 - 1531.
- [7] 朱元青, 陈正汉. 研究黄土湿陷性的新方法[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(4): 524 - 528. (ZHU Yuan-qing, CHEN Zheng-han. A new method of studying collapsibility of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(4): 524 - 528. (in Chinese))
- [8] 蒲毅彬, 陈万业, 廖全荣. 陇东黄土湿陷过程的 CT 结构变化研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(1): 49 - 54. (PU Yi-bin, CHEN Wan-ye, LIAO Quan-rong. Study on the variation of CT structure of loess during collapse in Longdong[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(1): 49 - 54. (in Chinese))
- [9] 雷胜友, 唐文栋. 黄土在受力和湿陷过程中微结构变化的 CT 扫描分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(24): 4166 - 4169. (LEI Sheng-you, TANG Wen-dong. Analysis of variation of loess's microstructure during loading and collapse from computed tomography scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(24): 4166 - 4169. (in Chinese))
- [10] 王朝阳, 倪万魁, 蒲毅彬. 三轴剪切条件下黄土结构特征变化细观试验[J]. 西安科技大学学报, 2006, **26**(1): 51 - 54. (WANG Chao-yang, NI Wan-kui, PU Yi-bin. Microscopic experiment on loess structure under triaxial test conditions characteristic[J]. Journal of Xi'an University of Science and technology, 2006, **26**(1): 51 - 54. (in Chinese))
- [11] 陈正汉, 卢再华, 蒲毅彬. 非饱和三轴仪的 CT 机配套及其应用[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(4): 387 - 392. (CHEN Zheng-han, LU Zai-hua, PU Yi-bin. The matching of computerized tomography with triaxial test apparatus for unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(4): 387 - 392. (in Chinese))
- [12] 陈正汉, 孙树国, 方祥位, 等. 土工多功能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 Zheng-han, SUN Shu-guo, FANG Xiang-wei, et al. Development and application of multi-function geotechnical triaxial apparatus[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2007, **23**(4): 1 - 5. (in Chinese))
- [13] 魏学温. 膨胀土的湿胀变形与结构损伤演化特性研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2007. (WEI Xue-wen. Study on the bulking deformation and characteristics of structure's damage evolution of expansive soil[D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2007. (in Chinese))
- [14] 朱元青. 基于细观结构变化的非饱和原状湿陷性黄土的本构模型研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2008. (ZHU Yuan-qing. A constitutive model for intact unsaturated collapsible loess based on the variation of the meso-structure[D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2008. (in Chinese))
- [15] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学, 1980(12): 1203 - 1208. (GAO Guo-rui. Sorts of microstructure and collapsibility of loess[J]. Science in China, 1980(12): 1203 - 1208. (in Chinese))
- [16] 雷祥义. 黄土显微结构类型与物理力学性质指标之间的关系[J]. 地质学报, 1989(2): 182 - 191. (LEI Xiang-yi. The relationship between the types of microstructure and index of physics and mechanics of loess[J]. Chinese Journal of Geology, 1989(2): 182 - 191. (in Chinese))
- [17] 谢定义, 齐吉琳. 土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 Ding-yi, QI Ji-lin. New approach in research on soil structure and its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(6): 651 - 656. (in Chinese))