

原状 Q_3 黄土湿陷特性的CT - 三轴试验

李加贵, 陈正汉, 黄雪峰

(解放军后勤工程学院 军事建筑工程系, 重庆 401311)

摘要: 利用应力控制式 CT - 三轴仪及 CT - 湿陷性三轴仪, 在控制吸力的条件下, 试验研究原状 Q_3 黄土的浸水湿陷特性。做了 2 组共 15 个三轴试验, 包括均压浸水试验和以双线法进行的侧向卸荷浸水试验, 试验中利用 CT 机进行无损断面扫描, 并用得到的 CT 数定量分析原状 Q_3 黄土的结构对湿陷的影响。结果表明: 对于双线法湿陷试验, 同一吸力和偏应力下, 固结净围压大的试样湿陷变形大于固结净围压较小的试样湿陷变形, 包括体应变、轴应变及偏应变; 均压浸水湿陷试验时, 在试样饱和前, 随着浸水量的增加 CT 数与浸水量之间基本呈线性关系; 当试样趋于饱和时, CT 数增大减缓; 均压浸水湿陷试验中, 在同一吸力下, 固结净围压大的湿陷体应变较大, 结构演化变量值也越大。

关键词: 土力学; 非饱和 Q_3 黄土; 湿陷; CT - 三轴试验; 结构性

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)06 - 1288 - 09

CT-TRIAXIAL TEST FOR COLLAPSABILITY OF UNDISTURBED Q_3 LOESS

LI Jiagui, CHEN Zhenghan, HUANG Xuefeng

(Department of Architecture and Civil Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401311, China)

Abstract: The collapsability test for undisturbed Q_3 loess under suction control is studied with stress controlled triaxial apparatus. 15 CT-triaxial tests are performed, including double-triaxial unloading confining pressure tests and isotropic compression tests. During the tests, computerized tomography(CT) is employed. Using the CT data, the effect of the Q_3 loess's structure is analyzed. The results show that, for the double triaxial collapsible tests, collapsible deformation increases with net confining pressure increasing, including the volumetric strain, axial strain and deviator strain. For the isotropic compression collapse tests, the relationship between water content and the CT data is linear before the specimen is saturated. The CT data increasing velocity will slow down with high enough saturation. For the isotropic compression collapse tests, if the specimen has the same suction, the high net confining pressure versus big volumetric strain, and the value of the structural evolution have the same rule, too.

Key words: soil mechanics; unsaturated Q_3 loess; collapsability; CT-triaxial test; structure

1 引言

黄土的微结构特征决定了其具有湿陷性, 同时也具有较强的结构性和结构强度。黄土湿陷变形具

有突变性, 非连续性和不可逆性^[1]。陈正汉和刘祖典^[2]通过研究指出, 湿陷变形包括湿陷体积变形和剪切变形两部分, 当 K (等应力比)较大时主要表现为湿陷体积变形, 当 K 较小时主要表现为湿陷剪切变形。黄土在浸水过程中结构破坏, 强度降低类似于

收稿日期: 2009 - 12 - 31; **修回日期:** 2010 - 03 - 23

作者简介: 李加贵(1978 -), 男, 2001 年毕业后解放军后勤工程学院军事建筑工程系结构工程专业, 现为博士研究生, 主要从事非饱和土理论与工程应用等方面的研究工作。E-mail: my707@126.com

软化; 湿陷后体积压密, 新的结构强度类似于硬化。湿陷变形与应力状态和应力路径有密切关系, 且受平均应力 p 与剪应力 q 的交叉影响, 其间的定量关系可用双曲线和幂函数表征。

对于黄土湿陷的机制, 高国瑞通过对黄土的微结构研究指出^[3], 黄土湿陷的最根本原因是黄土具有比较特殊的粒状架空体系, 这个体系首先在堆积过程中形成非正常配位的架空孔隙, 其次颗粒间的连结强度是在干旱、半干旱条件下形成的。

黄土的湿陷对建筑工程有较大的伤害, 需预先处理^[4], 若湿陷地区的建筑工程出现问题也可进行纠正^[5]。

谢定义等^[6]提出综合结构势的概念。齐吉琳等^[7]指出土结构性研究有 3 条途径, 即微结构形态学的研究方法, 固体力学的研究方法及土力学的研究方法。蒲毅彬等^[8]采用 CT 机结合简易压力室对原状黄土在单轴有侧限压力试验、三轴压力试验、渗水试验及加荷条件下浸水试验过程中进行了扫描。得到了原状黄土断面图像。雷胜友和唐文栋^[9]等在室内三轴剪切试验过程和三轴湿陷试验过程中对 Q₃ 原状黄土进行了 CT 扫描。认为剪切过程中应变软化是由于围压小于结构强度形成的; 应变硬化在屈服损伤破坏后期的强度增长是因为材料的密度提高和截面积的增长; 湿陷过程中易溶盐的溶解对湿陷过程有贡献。可见, 目前的研究多是处于定性分析上, 至于结构性对湿陷的定量计算, 目前鲜见报道。

陈正汉等^[10-12]研制了 CT - 三轴仪, 并通过非饱和土三轴 CT 试验能从细观和宏观 2 个方面揭示了原状土的结构损伤演化和变形强度规律, 所研制的 CT - 三轴仪为深入探讨土(特别是原状土和非饱和土)的力学特性提供了有力工具。朱元青和陈正汉^[13]研制了可以浸水的三轴底座, 并利用该仪器进行了净围压相同吸力不同和吸力相同净围压不同的双线法三轴湿陷试验。得到了吸力越大湿陷变形越大, 净围压对湿陷变形有显著影响的结论。所研制的非饱和土湿陷三轴仪为研究黄土的湿陷特性提供了方便。本文利用湿陷性三轴试验, 并借助于 CT 手段, 初步探讨黄土的结构性对湿陷影响的定量计算方法。

净平均应力和偏应力的表达式分别为

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u_a \quad (1)$$

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

式中: p , q , u_a 分别为净平均应力、偏应力和孔隙气压力; σ_1 , σ_2 , σ_3 分别为最大、中间和最小主应力; 本文用 ε_v , ε_s 分别表示土样的体应变和偏应力, 可定义为

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (3)$$

$$\varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (4)$$

式中: ΔV , V_0 分别为土样的体积改变量和的初始体积; ε_1 和 ε_3 分别为大主应变和小主应变。用 s , σ'_3 表示吸力和固结净围压, 定义为

$$s = u_a - u_w \quad (5)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u_a \quad (6)$$

式中: σ_3 为压力室压力, u_w 为孔隙水压力。

2 试验方法

2.1 试验操作及控制

测定黄土湿陷系数通常用固结仪按双线法和单线法试验步骤进行。用湿陷三轴仪测定湿陷系数也可用双线法和单线法。采用双线法进行湿陷试验时, 需要 2 个三轴试样, 2 个试样的天然密度差不超过 0.03 g/cm³, 含水率差值不超过 1%。一个试样在初始含水率下依次经历吸力平衡、等吸力固结、浸水饱和与逐级施加偏应力 4 个阶段, 称为饱和样。吸力平衡段将试样吸力调整为控制的吸力, 并使吸力在试样中均匀分布。判断吸力平衡和固结稳定的标准为: 体变在 2 h 的变化不超过 0.006 3 cm³, 排水在 2 h 内的变化不超过 0.012 cm³。等吸力固结阶段结束后, 同步降低围压和吸力值, 使净围压不变, 气压力降为 0。同步提高围压和浸水压力值, 以实现常净围压下的浸水。为了使试样内部的孔隙水压力较快地均匀化并加快渗透速度, 采用试样周边贴滤纸的方法。滤纸高 8.0 cm, 宽 0.6 cm, 在试样周边共贴 6 条。浸水时从铜圈上小孔浸水(见图 1), 从试样帽排水管排水。浸水过程的稳定标准为: 体变在 2 h 内不超过 0.006 3 cm³, 并且 2 h 内浸水量等于出水量。浸水饱和后按照侧向卸荷试验进行, 每次卸除 10 kPa 的围压, 同时通过增加相应的竖向应力以补偿因围压减小而引起的轴向力减小的部分, 待试样体积变化及轴向变形稳定后读数。每级偏应力荷载下稳定标准为: 轴向位移在 1 h 内不超过 0.01 mm, 体变在 2 h 内不超过 0.006 3 cm³, 排水在 2 h 内不超过 0.012 cm³。另一个试样在初始含

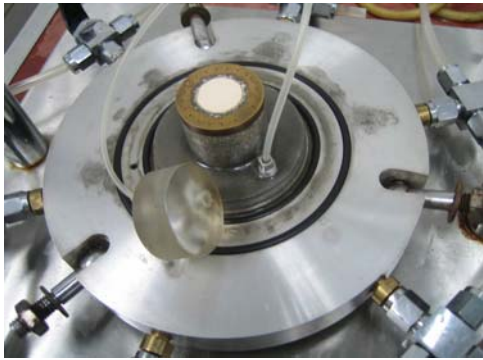


图1 湿陷三轴仪底座

Fig.1 Pedestal of triaxial apparatus for collapse



图2 后勤工程学院汉中 CT - 三轴工作站

Fig.2 CT-triaxial workstation of Logistical Engineering University of PLA at Hanzhong of Shaanxi Province

水率下依次经历吸力平衡、等吸力固结和逐级施加偏应力 3 个阶段。每级偏应力下体变、轴向位移、排水稳定后再加下一级。2 个试样在相同偏应力下的体应变、轴应变、偏应变之差即为湿陷体应变、轴应变、偏应变。饱和和在逐级施加偏应力排水剪切时，同时打开试样帽排水管阀门和铜圈进(排)水阀门，此时试样为双向排水，以缩短每级偏应力荷载下变形稳定时间。

本文的浸水试验与已有三轴浸水试验的区别在于应力路径。用侧向卸荷与浸水后再侧卸主要是为了模拟边坡的切削或是深基坑开挖等实际工程。在进行侧向卸荷剪切试验时，需在试样轴向变形过程中不断调整轴向荷载。湿陷过程中，偏应力作用下的轴向变形变化较快，偏应力会下降。为了控制湿陷过程中的偏应力，要求步进电机以较快速率增加偏应力到控制值，即尽可能用应变速率中的快档，但是过快的应变速率使偏应力的变化范围大，不能准确控制偏应力，且对试样有较大的扰动。经过反复比较，选择应变速率为 0.2 mm/min 调节偏应力变化。均压浸水试验的方法是在试验均压固结后，同步提高浸水水头及等值的净围压进行浸水，以保证实际净围压值不变。

2.2 试验仪器及方案设计

试验用仪器是非饱和土湿陷三轴仪(见图 1)，并能结合 CT 机进行无损实时扫描。关于仪器的介绍详见陈正汉等^[11]的介绍。使用的 CT 机是陕西省汉中市南郑县医院的医用 CT，该 CT 机是由 GE 公司生产的 ProSpeed AI 型 X - 射线螺旋 CT(见图 2)，具有快速、薄层(1 mm)扫描的高分辨率能力，图像质量好，并具高智能、低毫安、自动网络传输等特点。在试验剪切过程中，利用 CT 机对试样内部结构的变化进行动态观察，并用附带软件进行了定量分析。

侧向卸荷试验中，根据剪切的轴向变形量、浸水量进行 CT 图像扫描，当轴变为 0%，2.5%，5%，7.5%，10%，12.5%，15% 时扫描；浸水试验中，扫描时刻采用浸水量控制，按照 5.0，10.0，12.5，15.0 和 17.5 g，至饱和状态再扫描一次。剪切时或浸水湿陷根据应力应变曲线情况决定扫描时刻，并按轴向位移调整扫描位置，对断面进行跟踪扫描，共扫描 7 次；每次扫描 2 个断面，扫描位置(除注明外)分别距土样底端 1/3 和 2/3 高度处，浸水试验中增加 3 个断面，分别距底面高为 1/6，1/2 和 5/6。

试验所用土样取自兰州理工大学后山一个高边坡内，取土深度 7.5 m，属于 Q₃ 自重湿陷性黄土。试样的高度和直径分别为 8.00 和 3.91 cm。各试验的初始条件如表 1 所示，扫描参数如表 2 所示。

表 1 试样初始条件
Table 1 Original condition of samples

试验类型	序号	吸力 s /kPa	固结净围压 σ'_3 /kPa	干密度 ρ_d /($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙比 e	含水率 w /%
均压浸水	1		50	1.31	1.06	16.2
	2	50	100	1.33	1.03	17.0
	3		200	1.32	1.05	18.0
	4		50	1.32	1.05	17.7
	5	100	100	1.32	1.05	17.7
	6		200	1.30	1.07	17.8
	7		50	1.27	1.13	17.2
	8	200	100	1.28	1.12	17.5
	9		200	1.28	1.12	17.8
侧向卸荷	10		200	1.34	1.02	17.0
	11	100	250	1.34	1.02	17.5
	12		300	1.36	0.99	17.1
浸水后侧向卸荷	13		200	1.32	1.05	17.8
	14	100	250	1.33	1.04	17.7
	15		300	1.32	1.05	16.8

表 2 扫描参数
Table 2 Scanning parameters

电压 /kV	电流 /mA	时间 /s	层厚 /mm	重建矩阵	空间分辨率 /mm
120	165	3	3	512×512	0.38

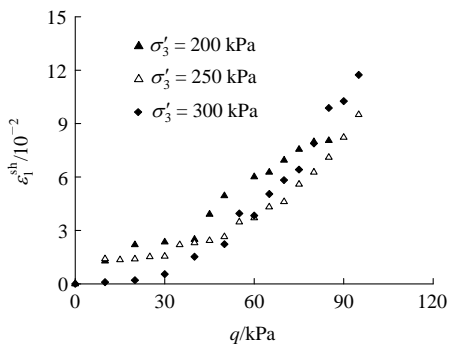
由于试样的初始含水率很低, 在 2.0%~3.4% 之间, 初始吸力值高。在切土盘上削完后, 将试样的初始含水率统一调整为 17% 左右, 以便在控制吸力值较低的试验中, 试样仍能排水。加水量约为 20 g, 为使水分均匀扩散, 所加水用注射器分几次缓慢均匀滴入土样中, 每次加水间隔数小时。加水后每 12 h 翻动一下土样, 在保湿罐中放置 72 h 以上取出装样。共进行了 3 种类型的 15 个试样的试验, 试验均是先在控制吸力条件下完成固结后进行: (1) 9 个控制吸力为 50, 100 和 200 kPa, 固结净围压为 50, 100 和 200 kPa 的均压浸水试验; (2) 3 个吸力为 100 kPa, 固结净围压为 200, 250 和 300 kPa 的侧向卸荷剪切试验; (3) 3 个吸力为 100 kPa, 固结净围压为 200, 250 和 300 kPa 的浸水湿陷后进行侧向卸荷的剪切试验, 后 2 种试验就是双线法。

3 试验结果分析

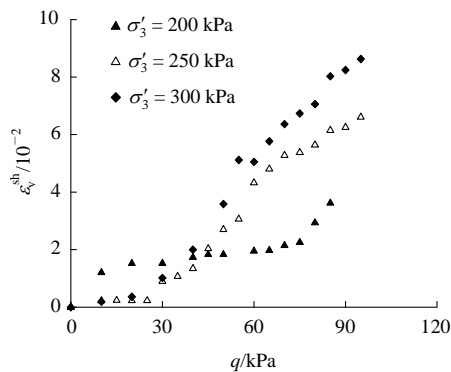
3.1 双线法试验结果分析

由前述方法对所进行的双线法试验, 即 10~15 号试样的结果进行了整理, 得到湿陷轴应变、湿陷体应变及湿陷偏应变结果见图 3。

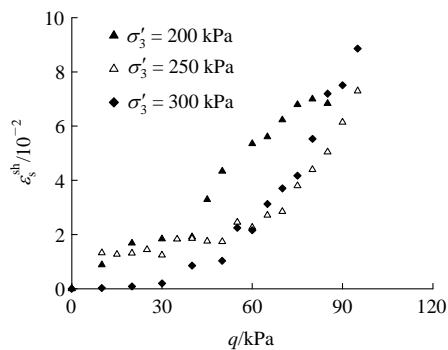
从图 3 中可看出, 同一吸力和偏应力下, 最终湿陷变形净围压较大的试样大于净围压较小试样, 包括体应变、轴应变及偏应变变量。当偏应力值低于 60 kPa 时, 湿陷轴应变和偏应变随偏应力增大变



(a) 湿陷轴应变 - 偏应力



(b) 湿陷体应变 - 偏应力



(c) 湿陷偏应变 - 偏应力

图 3 吸力 100 kPa 不同净围压下试验结果

Fig.3 Test results at suction of 100 kPa and various net confining pressures

化较小, 但是当偏应力大于 60 kPa 后, 这两者随偏应力增大变化剧烈, 这就是图 3 中出现交叉现象的主要原因。吸力为 100 kPa 时, 偏应力 30 kPa 下净围压较小的湿陷变形大于净围压较大的。这是由于净围压小的, 其初始可变性要强烈一些, 但最终湿陷量的大小与其所受球应力有直接关系, 所以固结净围压大的, 其最终湿陷量要大。

3.2 均压浸水湿陷性分析

图 4 是均压条件下, 吸力分别为 50, 100 和 200 kPa 时, 湿陷体应变与浸水量的关系。浸水引起了 Q₃ 黄土的湿陷, 在均压条件下, 其湿陷反映在体积变化上。在同一吸力下, 有效净围压大的湿陷体应变也大。这说明, 湿陷是水和净球应力共同作用的结果。同时, 由图 4 也可以看出, 在同一球应力下且浸水量相同时, 吸力较大的湿陷变形量也越大, 这是由于吸力越大, 土骨架的孔隙率较大, 其可变性较大, 湿陷变形变就会较大。

3.3 Q₃ 黄土的结构性与湿陷关系

3.3.1 由 CT 图像反映的湿陷现象分析

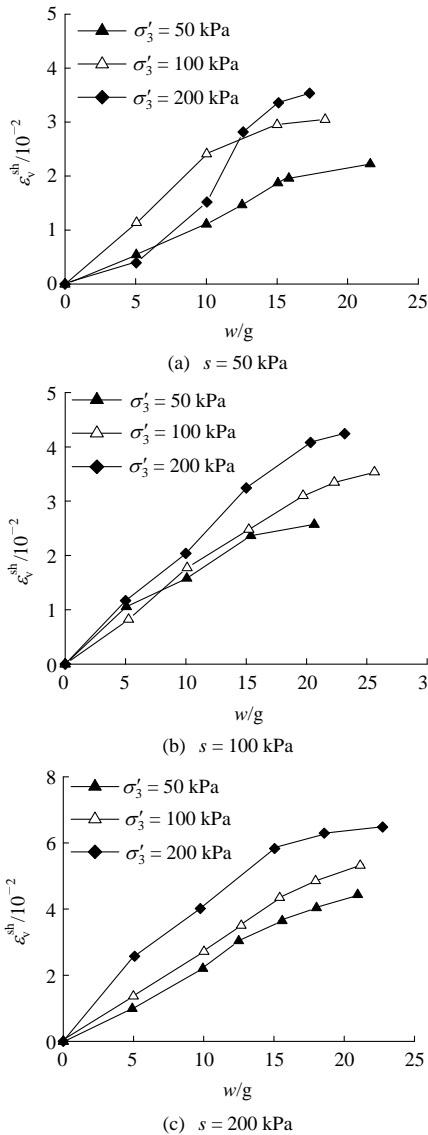


图4 不同吸力条件下含水量与体应变关系

Fig.4 Collapsible volumetric strain versus quantity of water with various matrix suctions

在 CT 扫描图像中黑色区域代表土中的低密度部分，主要是孔隙裂隙等；白色为高密度区，主要是黄土的胶结；从黑色区域过渡到白色区域的灰色区域，是黄土中土颗粒等。图 5 为 11# 试样 2/3 高处断面扫描 CT 照片，扫描顺序为(a)~(g)，分别与轴应变为 0.0%，2.5%，5.0%，7.5%，10.0% 和 15.0% 相对应。可以清楚地看出，非饱和 Q₃ 黄土的微观结构演化过程。初始时土样断面上有孔隙及微裂纹，说明初始状态的土样结构的不均质性比较明显。总的来看，图像是由较暗逐步变亮的过程，在 CT 数值上的反映为 CT 数不断增大，方差不断减小；表明密度逐渐增大，不均匀性不断减小。随着土样剪切的进行，大孔隙逐渐闭合，如图 5(a)~(d) 中，图像上部存在一个较大孔洞，随着试样被压密，

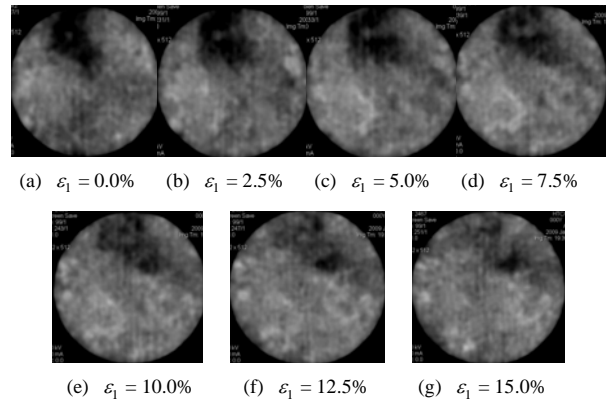


图5 11#试样 2/3 高处断面侧向卸荷过程中的 CT 图像
Fig.5 CT images of sample #11 at 2/3 height during unloading confining pressure test

孔洞面积逐渐减小，到图 5(g)时，孔洞的面积已经变得很少。对于本已经较密集区域，偏应力的增大，使得这些区域中的土质更加均匀。反映在 CT 图中就是高亮点减小，灰度区的面积增大。在试样固结完毕时，其裂隙比较明显，但随着剪切的进行，其宽度逐步减小，并最终消失。从宏观上讲，这可以认为是结构的愈合。同时，由结构破坏引起土细粒填充了较大的孔隙，导致截面的 CT 数在增加。

图 6 是 CT 图像可划分为 3 个阶段，图 6(a)是在控制吸力的条件下固结后扫描得到的；图 6(b)是在均压条件下进行浸水饱和后的扫描得到的；图 6(c)~(h)反映的是饱和土样进行侧向卸荷剪切试验过程。孔洞消失与否取决于其应力状态。从图 6 可以看出，单纯的均压固结及单纯的浸水湿陷不能使 Q₃ 黄土的大孔洞完全消失。

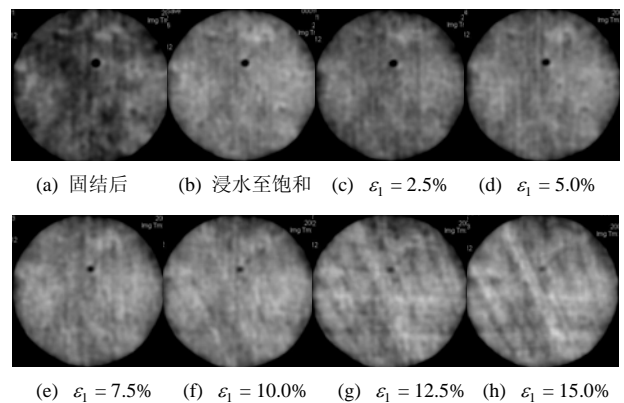


图6 14#试样距底 13.3 cm 断面侧向卸荷过程中的 CT 图像
Fig.6 CT images of sample #14 at 13.3 cm height during unloading confining pressure test

在均压浸水湿陷试验条件下，湿陷的发生区别于有偏应力存在的情况。从 CT 图像上看，土样中相当部分被土粒填充，小部分被水填满，还有极少部分孔隙没有被土粒和水填满。未被土粒和水填满

的这部分孔隙多是一些孤立的圆形(或椭圆形)孔隙, 且主要位于试样中上部, 如图 7 中的右上角部分。土体中的孔隙、裂隙等逐渐变小, 消失(见图 8, 9); 保留下来的少量的未被土粒和水填满的孔隙说明浸水前的应力和水的共同作用不足以完全破坏试样的细观结构。但是, 这部分孔隙也有逐渐变小的趋势, 如果增大应力, 这部分孔隙也会逐渐消失。未被土粒和水填满的孔隙有较大的孔隙, 也有较小的孔隙, 因此认为湿陷变形主要是由大孔隙的塌陷造成的, 或者认为湿陷变形主要由某个范围尺寸

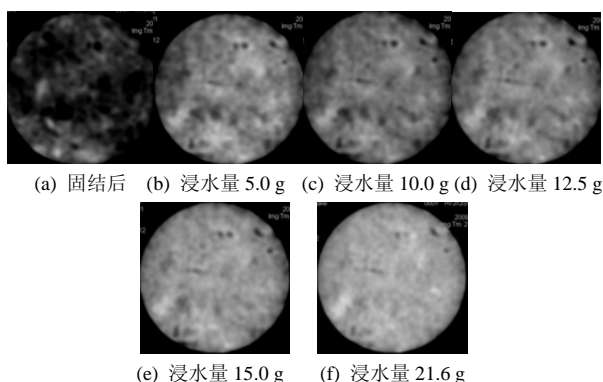


图 7 1#试样 2/3 高断面浸水湿陷过程中的 CT 图像

Fig.7 CT images of sample #1 at 2/3 height during saturating

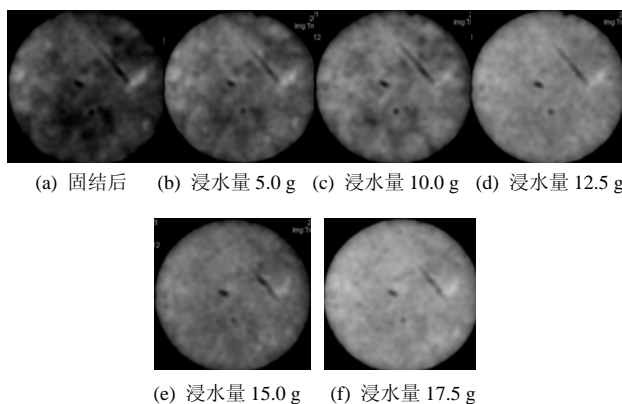


图 8 9#试样 1/2 高断面浸水湿陷过程中的 CT 图像

Fig.8 CT images of sample #9 at 1/2 height during saturating

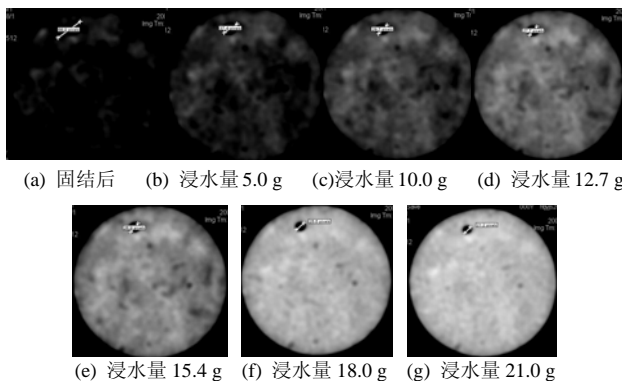


图 9 8#试样 2/3 高处断面上孔洞变化 CT 图像

Fig.9 Cavity variation in CT images of sample #8 at 2/3 height

的孔隙引成的这些观点有待进一步探讨。其实孔隙的形状以及与周围颗粒的连接等的关系更密切, 当应力状态改变较大时, 也即力的作用足以破坏孔隙周围的结构时, 孔隙被破坏, 否则孔隙不发生变化或变化很小。

从图 10 中的 CT 图像可以明显看出水至底部逐渐向上渗入土体的全过程。第 2 次扫描时, 此时浸水量为 10 g, 水已经浸透到 1/3 截面高度, 并开始向 1/2 高度处渗透; 从 CT 数上看, 1/6, 1/3, 1/2, 2/3, 5/6 高处断面, CT 值随着浸水量变化依次为: 1 208.75, 1 193.00, 1 085.81, 1 000.96, 984.62 HU (HU 为 CT 数单位)。

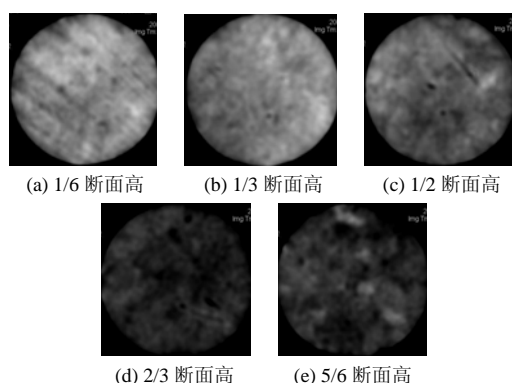


图 10 9#试样 1/6, 1/3, 1/2, 2/3, 5/6 高处断面当浸水量为 10 g 时的 CT 图像

Fig.10 CT images of sample #9 at 1/6, 1/3, 1/2, 2/3, 5/6 height when the quantity of saturating water is 10 g

由前面的分析可知, 尽管土样在剪切或浸水后结构变得密实均匀, 但胶结形成的原有结构破坏。故土样的剪切或湿陷过程, 既是原有结构破损又新的结构形成的过程, 也就是说不仅有损伤, 而且有愈合。关于损伤部分可由 CT 数的增加明显看得出。笔者认为, 经外力或浸水作用导致的较宽的裂隙变窄甚至消失或是较大孔洞面积减小的过程, 均可认为是愈合。

对于愈合, 可用 8# 试样图像分析如下: 试样固结完成时, 其顶部存在较大孔洞, 用软件测得其随着浸水量的变化, 孔洞直径变化过程是: 6.80, 3.74, 2.97, 2.77, 2.69, 2.55 和 2.12 mm。从孔洞直径变化中可以看出, 其减小程度为 68.8%, 也即愈合的程度(见图 9)。

3.3.2 Q₃ 黄土的结构参数定义

CT 数据能反映土体密度和土粒的排列和分布情况, 因而能反映土的结构。可用基于 CT - 三轴试验得到的 CT 数据定义 Q₃ 黄土的结构参数, 在此基

础上研究 Q₃ 黄土在浸水湿陷作用下的结构演化规律。

试样初始的 CT 数和方差均值用 ME_i 和 SD_i 表示；剪切导致的试验偏应变达到 15% 的饱和土样视为原有结构破坏新的结构形成的土样，其相应的 CT 数和方差均值用 ME_f 和 SD_f 表示，则某一土样的基于 CT 数的结构参数定义为

$$m = \frac{ME_f - ME}{ME_f - ME_i} \quad (7)$$

或基于方差定义为

$$m = \frac{SD_f - SD}{SD_f - SD_i} \quad (8)$$

式中： ME 和 SD 为试样在剪切某一时刻的 CT 数和方差均值。由此确定的结构参数实际上是一个相对值。试样未受水和力的扰动时， $ME = ME_i$ ， $SD = SD_i$ ， $m = 1$ ；当土样完全调整后， $ME = ME_f$ ， $SD = SD_f$ ， $m = 0$ 。

由李加贵等^[14~16]的研究成果和前面的数据及分析可知，原状 Q₃ 黄土试样在三轴侧向卸荷剪切过程中，CT 数均值的变化幅度大于方差的变化幅度，这说明 CT 数均值比 CT 数方差敏感。故选用 CT 均值 ME 定义的结构参数来分析试样的结构变化。

在本文中，由 15 个试验可取 $ME_f = 1420$ HU， $ME_i = 920$ HU，这样就可以得到试样在剪切至某一时刻或达到某一浸水量时的结构参数 m 。

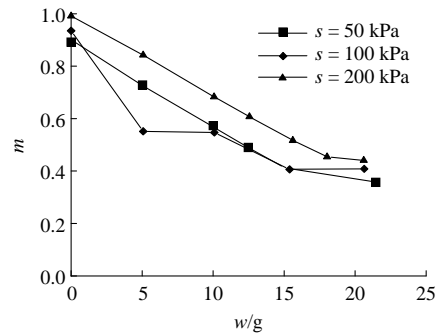
3.3.3 均压条件下浸水湿陷过程中结构性参数的变化

分析图 11, 12 可以看出，在均压条件下浸水湿陷过程中：(1) 当吸力相同时，初始结构性参数除与本身密度相关外，受固结净围压的影响较大，固结净围压大的，其初始结构性参数也较大；当浸水完毕时，其结构性受破坏程度也较大，这反映在其结构性参数在浸水完毕时相对于其他试样均较小。

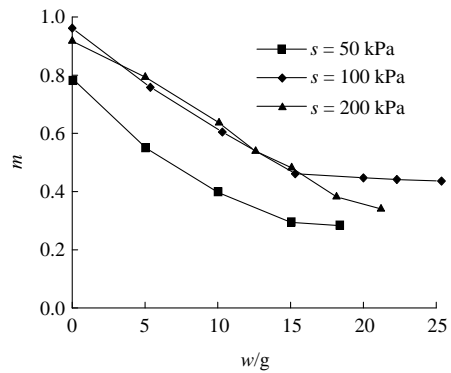
(2) 当固结净围压相同时，初始结构性参数受除了本身密度影响外，吸力的影响也较大，这是因为吸力较大的试样，其含水率也较低，这样其微结构中胶结物溶于水的量就较少，结构性保存较完整。随着浸水量的增大，原状 Q₃ 黄土的结构性不断遭受破坏。(3) 在试样未饱和前，结构参数与浸水量之间基本呈线性关系，随着浸水量的增加，结构性参数不断减小，但是当试样趋于饱和时，结构性参数的减小速率减缓。

3.3.4 均压条件下浸水湿陷过程中结构性对湿陷影响的定量计算

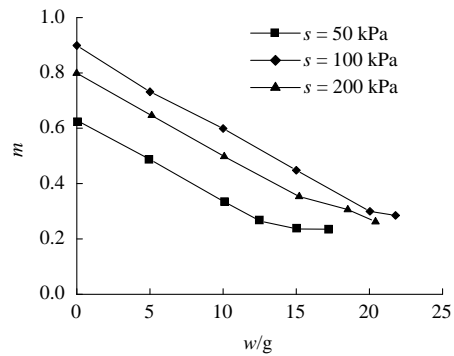
为了描述在均压湿陷过程中的结构演化规律，定义结构演化变量 D 为



(a) $\sigma'_3 = 50$ kPa



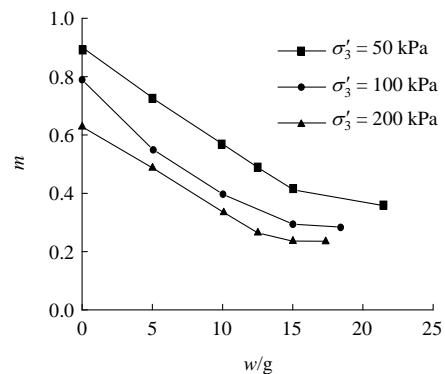
(b) $\sigma'_3 = 100$ kPa



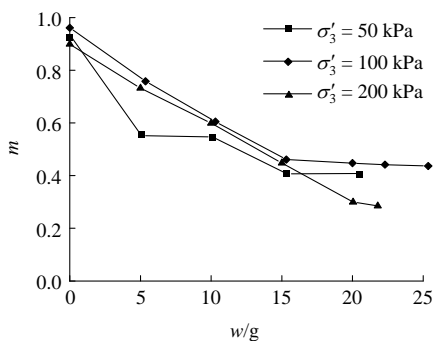
(c) $\sigma'_3 = 200$ kPa

图 11 不同吸力条件下浸水量与结构参数关系

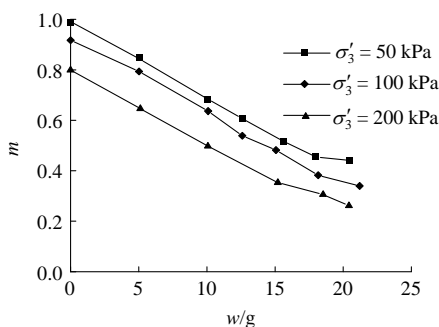
Fig.11 Relationships between structural parameter and quantity of saturating water under various suctions



(a) $s = 50$ kPa



(b) $s = 100 \text{ kPa}$



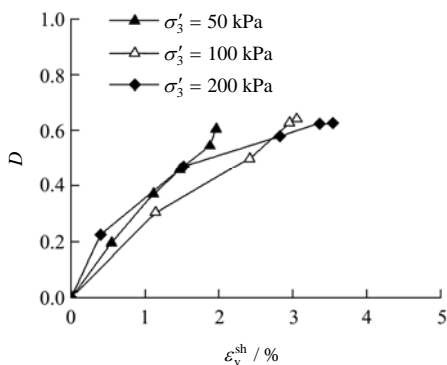
(c) $s = 200 \text{ kPa}$

图 12 不同净围压条件下浸水量与结构参数关系

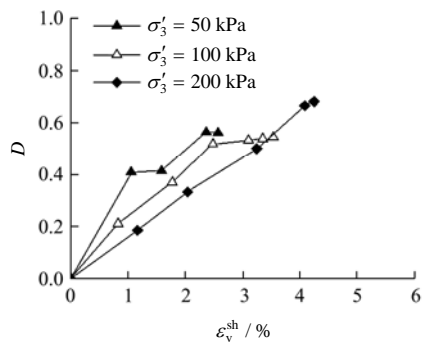
Fig.12 Relationships between structural parameter and quantity of saturating water under various net confining pressures

$$D = \frac{m_0 - m}{m_0} \quad (9)$$

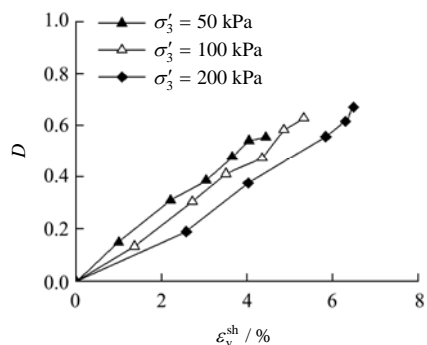
式中: m_0 和 m 分别为土样初始状态和浸水至某一时刻的结构参数。 D 的变化范围从初始状态时的 0 到湿陷完成时的 1。由于三轴湿陷过程中的应变(轴应变及体应变)的计算均以固结后的试样为基准, 因此式(9)中的 m_0 取固结后试样的结构参数。此时, 相应于固结后的结构演化变量等于 0。图 13 为浸水过程中结构演化变量与体应变的关系。从图 13 中可以看出, 当浸水前吸力相同时, 净围压越大, D 值越大; 当固结净围压相同时, 吸力越大, D 值越小。



(a) $s = 50 \text{ kPa}$



(b) $s = 100 \text{ kPa}$



(c) $s = 200 \text{ kPa}$

图 13 结构演化变量与湿陷性体变关系

Fig.13 Relationships between structural parameter and collapsible volumetric strain

由图 13 可知, 浸水湿陷过程中的结构演化变量 D 与体应变 ϵ_v^{sh} 为指数增长关系; 浸水是导致结构演化的又一原因, 且浸水与固结净围压及偏应力之间为耦合作用, 浸水反映在饱和度的增量上。用 Matlab 程序提供的拟合函数进行非线性拟合。浸水湿陷结构演化方程用以下函数表达式的拟合效果较好, 其具体形式为

$$D = 1 - \exp[-(A_2 \epsilon_v^{\text{sh}} + A_3) \Delta S_r] \quad (10)$$

式中: ΔS_r 为试样饱和度增量; A_2 , A_3 均为拟合参数, 是固结净围压的函数。

对于均压浸水的 1[#]~9[#] 试验进行线性回归分析, 得 A_2 , A_3 值, 计算结果如表 3 所示。

分析可知, 参数 A_2 是固结净围压和控制吸力的函数, A_3 为常数项, A_2 可以拟合为

$$A_2 = \frac{\alpha_1}{\sigma'_3} + \frac{\alpha_2}{s} + \alpha_3 \quad (11)$$

式中: α_1 , α_2 , α_3 为拟合参数, 在本文中, 其分别值为: -0.2324 , -0.0767 和 -0.0018 。本拟合的相关度为 0.86%, 估计误差方差为 0.003, 可见效果比较理想。

表3 均压浸水各试样拟合参数 A_2 , A_3
Table 3 Imitated parameters of isotropic saturating specimens A_2 , A_3

序号	吸力 s /kPa	净围压 σ_3' /kPa	A_2	A_3
1		50	-0.008 5	0.171 2
2	50	100	-0.006 9	0.163 1
3		200	-0.006 1	0.213 8
4		50	-0.006 1	0.260 4
5	100	100	-0.004 8	0.144 7
6		200	-0.003 8	0.098 5
7		50	-0.003 7	0.111 2
8	200	100	-0.003 7	0.083 8
9		200	-0.003 1	0.081 3

4 结 论

(1) 由侧卸方法的双线法湿陷试验结果可知, 同一吸力和偏应力下, 净围压大的试样湿陷变形大于净围压较小的试样湿陷变形, 包括体应变、轴应变及偏应变量; 当偏应力值低于 60 kPa 时, 湿陷轴应变和偏应变随偏应力增大变化较小, 但是当偏应力大于 60 kPa 后, 这两者随偏应力增大变化剧烈。吸力为 100 kPa、偏应力 30 kPa 时, 净围压较小的湿陷变形大于净围压较大的湿陷变形。

(2) 均压浸水湿陷试验中, 在同一吸力下, 有效净围压大的湿陷体应变也大; 若吸力较大, 随着净围压的增大, 湿陷变形量也越大。

(3) 当吸力相同时, 净围压越大, 结构演化变量值越大。构建的结构演化变量可为定量计算结构对湿陷性的影响。

参考文献(References):

[1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.(LIU Zudian. Engineering and mechanics of loess[M]. Xi'an: Science and Technology Press of Shaanxi, 1997.(in Chinese))

[2] 陈正汉, 刘祖典. 黄土的湿陷变形机制[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(3): 1 - 12.(CHEN Zhenghan, LIU Zudian. Mechanism of collapsible deformation of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(3): 1 - 12.(in Chinese))

[3] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4): 1 - 10.(GAO Guorui, A structure theory for collapsing deformation of loess soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4): 1 - 10.(in Chinese))

[4] 黄雪峰, 陈正汉, 方祥位, 等. 大厚度自重湿陷性黄土地基处理厚度与处理方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 2): 4 332 - 4 338.(HUANG Xuefeng, CHEN Zhenghan, FANG Xiangwei, et al. Study of foundation treatment thickness and treatment method for collapse loess with large thickness[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.2): 4 332 - 4 338.(in Chinese))

[5] 朱彦鹏, 王贵文, 王秀丽, 等. 诱使沉降法纠正偏移建筑的模型试验及案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增 1): 3 288 - 3 296.(ZHU Yanpeng, WANG Guiwen, WANG Xiuli, et al. Model test on rectification of inclined buildings by induced settlement method and case studies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supp.1): 3 288 - 3 296.(in Chinese))

[6] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构参数及其与变形强度的关系[J]. 水利学报, 1999, 30(10): 1 - 6.(XIE Dingyi, QI Jilin, ZHU Yuanlin. Soil structure parameter and its relations to deformation and strength[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(10): 1 - 6.(in Chinese))

[7] 齐吉琳, 谢定义, 石玉成. 土结构性的研究方法及其现状[J]. 西北地震学报, 2001, 23(1): 99 - 103.(QI Jilin, XIE Dingyi, SHI Yucheng. Status quo and method of quantitative study on soil structure[J]. Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(1): 99 - 103.(in Chinese))

[8] 蒲毅彬, 陈万业, 廖全荣, 等. 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 Yibin, CHEN Wanye, LIAO Quanrong, et al. Research on CT structure changing for damping process of loess 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): 4 166 - 4 169.(LEI Shengyou, TANG Wendong. Analysis of microstructure change for loess in the process of loading and collapse with CT scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4 166 - 4 169.(in Chinese))

[10] 陈正汉, 谢云, 孙树国, 等. 温控土工三轴仪的研制及其应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 928 - 933.(CHEN Zhenghan, XIE Yun, SUN Shuguo, et al. Temperature controlled triaxial apparatus for soils and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 928 - 933.(in Chinese))

[11] 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 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. 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))

[13] 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 Yuanqing, CHEN Zhenghan. A new method of studying collapsibility of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(4): 524 - 528.(in Chinese))

[14] 李加贵, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和 Q_3 黄土在侧向卸荷过程中的细观结构演化及强度特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1 084 - 1 091.(LI Jiagui, CHEN Zhenghan, HUANG Xuefeng, et al. CT-triaxial shear tests on the meso-structure evolution and strength of unsaturated Q_3 loess during unloading confining pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1 084 - 1 091.(in Chinese))

[15] 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[博士学位论文][D]. 重庆: 解放军后勤工程学院, 2008.(ZHU Yuanqing. Study of unsaturated and collapsibility model of loess at original state considering meso-structure evolution[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Logistical Engineering University of PLA, 2008.(in Chinese))

[16] 方祥位. 非饱和原状 Q_2 黄土的湿陷机制及结构性本构模型研究[博士学位论文][D]. 重庆: 解放军后勤工程学院, 2008.(FANG Xiangwei. Study of collapse mechanism and structural model of unsaturated Q_2 loess at original state[Ph. D. Thesis][D]. Chongqing: Logistical Engineering University of PLA, 2008.(in Chinese))