

# 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征

唐朝生，施斌

(南京大学地球科学与工程学院，江苏 南京 210093)

**摘要：**为了了解干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征，分别开展了两组干湿循环试验。在控制吸力干湿循环试验中，吸力控制范围为0.4~262 MPa，采用了两种吸力控制方法，分别为渗析法（吸力<4 MPa）和蒸汽平衡法（吸力>4 MPa），当每一级吸力达到平衡时，测量试样对应的含水率和体积；在常规干湿循环试验中，采取了两种干缩路径，分别为全干燥和部分干燥，并测量试样在每次干湿循环过程中的轴向变形及循环结束后的含水率。结果表明：在脱湿和吸湿过程中，试样孔隙比随吸力变化可分3个典型阶段：大幅变化阶段（0.4~9 MPa）、过渡阶段（9~82 MPa）和平缓阶段（82~262 MPa）；当吸力大于113 MPa时，试样的胀缩变形基本可逆，而当吸力小于113 MPa时，试样的胀缩变形表现出明显的不可逆性，且不可逆程度随吸力的减小而增加。试样在常规干湿循环过程中的胀缩变形随循环次数的增加逐渐趋于稳定；胀缩特征受干缩路径的影响非常明显，全干缩路径中测得的膨胀率高于部分干缩路径，膨胀速率随干湿循环次数的增加而增加；试样在干湿循环过程中的膨胀率大小在一定程度上取决于吸湿能力。

**关键词：**膨胀土；干湿循环；土吸力；膨胀势；体积收缩；干缩路径

中图分类号：TU443 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2011)09-1376-09

**作者简介：**唐朝生(1980- )，男，湖南衡阳人，博士，副教授，主要从事环境岩土工程和工程地质方面的教学和研究工作。E-mail: tangchaosheng@nju.edu.cn。

## Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil during wetting-drying cycles

TANG Chao-sheng, SHI Bin

(School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Two groups of laboratory cyclic wetting-drying tests are conducted on expansive soil to study the swelling and shrinkage behaviour. In suction-controlled wetting-drying tests, two suction control methods are used: the osmotic method for low suction range (0.4~4 MPa) and the vapor equilibrium technique for high suction range (4~262 MPa). At each suction level, water content and volume of soil specimen are determined after equilibrium is reached. In conventional wetting-drying tests, soil specimen is allowed to swell, and either shrinks fully or partially to the initial height in each cycle. Simultaneously, axial deformation is measured. After each cycle, the water content of specimen is also assessed. The results show that the void ratio of specimen varies with the suction in three typical stages in both drying and wetting paths, i.e., sharp variation stage (0.4~9 MPa), transition stage (9~82 MPa) and peace stage (82~262 MPa). The reversibility in the swelling and shrinkage deformation is found when the suction is higher than 113 MPa, but significant hysteresis is observed as the suction is lower than 113 MPa and the hysteresis extent increases with decreasing suction. In conventional wetting-drying tests, it is observed that the swelling and shrinkage behaviour gradually reaches equilibrium with increasing cycles and is significantly influenced by shrinkage pattern. The measured swelling potential of specimen subjected to full shrinkage cycle is higher than that of specimen subjected to partial shrinkage cycle. Swelling velocity increase with the increase of the wetting-drying cycle is noted when the specimen fully shrinks. Generally speaking, the swelling ability of specimen in wetting-drying cycle significantly depends on water absorption capability.

**Key words:** expansive soil; wetting-drying cycle; soil suction; swelling potential; volume shrinkage; shrinkage pattern

## 0 引言

膨胀土在我国分布较广，是一种典型的“问题性”

基金项目：国家自然科学基金项目（41072211）；高等学校博士学科点专项科研基金项目（新教师基金课题）(20090091120037)；国家自然科学基金重点项目（40730739）

收稿日期：2010-07-06

土, 湿胀干缩变形是其基本性质之一, 对岩土工程、

道路工程、水利工程、工业与民用建筑工程的安全性

表 1 土样的基本物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical behaviors of soil

比重 $G_s$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	粒度 $\leq 2\text{ mm}$ /%	主要黏土矿物	自由膨胀率 /%	最大干密度 $\rho_d/(\text{g cm}^{-3})$	最优含水率 $w_{opt}/\%$
2.73	63.7	25.3	38.4	57.1	蒙脱石 - 伊利石	73	1.69	18.3

和稳定性有重要影响。在自然条件下, 由于气候(降雨和干旱)的周期性变化, 膨胀土经历往复的干湿循环和胀缩变形, 物理力学性质随之发生显著变化。如刘祖德等(1993)<sup>[1]</sup>和卢再华等(2002)<sup>[2]</sup>发现周期性的干湿循环作用会导致膨胀土中原生裂隙的扩展和新裂隙的产生, 并在土体中形成相互贯通的裂隙网络, 降低土体的整体性; Albrecht等(2001)<sup>[3]</sup>研究了干湿循环对膨胀土渗透性的影响, 发现渗透系数随干湿循环次数的增加而增加, 他们将该结果归因于膨胀土内部裂隙数量的增加; 杨和平等(2006)<sup>[4]</sup>通过室内试验, 发现膨胀土的抗剪强度随干湿循环次数的增加而衰减。

在膨胀土的诸多工程性质中, 胀缩性受干湿循环的影响一直是国内外研究的重点。过去几十年来, 许多学者围绕该课题开展了大量的室内和现场试验工作, 均发现试样在经历多次干湿循环后胀缩变形逐渐趋于稳定, 表现出可逆的性质, 但在达到稳定之前, 胀缩变形随干湿循环的具体演化过程却不尽相同。比如有的学者发现, 试样的膨胀变形随干湿循环次数的增加而增加<sup>[5-7]</sup>; 而有的学者则得到完全相反的规律, 即试样的胀缩变形随干湿循环次数的增加而逐渐减小<sup>[2, 4, 8]</sup>。归结起来, 造成上述差异的原因主要有3个方面的因素: 试验的加荷条件、干湿循环路径以及干湿循环方法。

有研究表明, 在高轴向应力作用下, 试样干湿循环过程中产生的不可逆收缩应变量会逐渐递增<sup>[9, 10]</sup>, 因为土颗粒的重排和微观结构调整导致试样的水敏性降低; Basma等(1996)<sup>[8]</sup>通过试验发现, 试样在干湿循环过程中所呈现的胀缩变形特征受初始含水率或吸力状态的制约; Alonso(1998)<sup>[11]</sup>指出, 在控制吸力条件下, 试样所表现的胀缩变形可分为两部分: 微观结构变形和宏观结构变形。一般情况下, 微观结构变形是可逆的, 而宏观结构变形的可逆性与干湿循环过程中的累积变形量有关。

在干湿循环试验方法方面, 常用的主要有两种: 控制吸力法和常规的浸水饱和-蒸发干燥法。前者由于试验操作过程复杂, 耗时较长, 目前在控制吸力条件下开展的膨胀土干湿循环试验相对较少, 已报道的大部分研究都是以常规法为主。但需要指出的是, 不同的试验方法模拟了不同的工况和气候条件。如控制

吸力法是为了模拟一种相对缓和的、渐变的干湿环境, 而常规法则是为了模拟一种极端的、剧烈的干湿环境。由于膨胀土在不同的干湿环境中脱湿和吸湿过程以及土-水作用方式不同, 其所表现的胀缩变形特征必然存在差异。

为了进一步了解干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征, 本文在控制吸力条件下和常规条件下分别对原状和重塑膨胀土样开展了干湿循环试验。考虑到实际工程中气候条件的多变性和自然环境的复杂性, 本文还探讨了不同干湿循环路径对膨胀土胀缩性的影响。相关研究结果对膨胀土地区的工程实践有一定指导意义。

## 1 试验材料

试验中所用膨胀土取自南京市浦口区, 呈灰白色, 取样深度约1.5 m, 初始含水率约33%, 初始干密度为1.43 g/cm<sup>3</sup>, 采用Whatman No.42滤纸测得初始吸力127 kPa, 滤纸法吸力测量原理和方法可参考文献[12]。经室内试验判定该土样为中等偏强膨胀土, 基本物理力学性质如表1所示。

## 2 试验方法

本文开展了两组干湿循环试验, 所采用的方法分别为控制吸力法和常规的浸水饱和-蒸发干燥法。

### 2.1 控制吸力干湿循环试验

控制吸力干湿循环试验所用土样为原状样, 吸力控制范围为0.4~262 MPa, 分别采用渗析法(吸力<4 MPa), 和蒸汽平衡法进行控制(吸力>4 MPa)。渗析法最先由生物学家Lagerwerff等(1961)<sup>[13]</sup>提出, 随后被Kassiff和Benshalom(1971)<sup>[14]</sup>、Delage等(1987)<sup>[15]</sup>应用到岩土工程中。在过去的20年里, 这种方法被不断改进, 并在非饱和土力学试验中得到广泛应用<sup>[16-18]</sup>。渗析技术控制吸力的原理非常简单, 即当土样中的水分通过半透膜与PEG(聚乙二醇)溶液的浓度达到平衡时, PEG溶液所对应的吸力即为土样的吸力。关于渗析技术更详细的介绍可参考叶为民等(2005)<sup>[19]</sup>、Delage和Cui(2008)<sup>[20]</sup>的研究。本次试验采用的溶液为PEG20000, 半透膜的最大允许通过分子量为 $1.2 \times 10^4 \sim 1.4 \times 10^4$ , 通过配制不同的溶液浓度, 控制吸

力值大小分别为 400, 600, 900, 1200 和 1500 kPa。试验时将多个 3~4 g 重的原状土样置于圆筒状的半透膜中, 一起浸入 PEG 溶液, 每间隔一定时间取出一个小土块进行称重, 并计算含水率, 当连续多次含水率差值小于 1% 时, 认为土样与对应 PEG 溶液的吸力值达到平衡。然后将土样浸入一种非浸润性的芳香族化合物 Kerdane 中, 利用阿基米德浮力原理测量土样的体积, 计算该吸力条件下土样孔隙比和饱和度等参数<sup>[21]</sup>。

蒸汽平衡法是目前最常用的高吸力控制技术, 主要通过不同的饱和盐溶液控制环境湿度, 从而达到控制土样吸力的目的, 相关细节可参考文献[19]、[22]和[23]。本次试验中采用的饱和盐溶液和对应吸力值如表 2 所示。试验时控制环境温度为 20 ℃, 将土样置于饱和盐溶液正上方, 并密闭在干燥器中, 每间隔一定时间称量土样的重量, 当土样的重量在 3 d 内的变化小于 0.01 g 时, 认为土样的吸力与对应饱和盐溶液的蒸汽压力达到平衡。然后采用上述同样的方法测量平衡时土样含水率、体积、孔隙比和饱和度。考虑时间因素, 本文只开展了一次控制吸力干湿循环试验, 脱湿过程中吸力变化路径为: 0.4, 0.6, 0.9, 1.2, 1.5, 4.2, 6.1, 9, 13.1, 24.9, 38, 57, 82, 113, 136, 262 MPa, 吸湿过程中吸力变化路径与脱湿过程相反, 共耗时约 8 个月。

表 2 饱和盐溶液及对应吸力值 (20 ℃)

Table 2 Saturated salt solution and corresponding suction (20 ℃)

饱和盐溶液	吸力/MPa
LiCl	262
MgCl <sub>2</sub>	136
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	113
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	82
NaNO <sub>2</sub>	57
NaCl	38
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	24.9
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> ·7H <sub>2</sub> O	13.1
KNO <sub>3</sub>	9
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	6.1
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.2

## 2.2 常规干湿循环试验

将取回的土样风干粉碎, 过 2 mm 筛, 按表 1 的最优含水率在土样中加入适量的水, 搅拌均匀后压实到表 1 所示的最大干密度, 压实后试样直径为 61.8 mm, 高度为 20 mm。将试样置于单轴固结仪中, 设定垂直压力为 20 kPa, 加水浸泡试样, 通过千分表实时记录试样的竖向膨胀变形。待试样膨胀稳定后, 将固结仪移入步入式人工气候箱中, 使试样在 40 ℃ 下干燥失水, 同时记录试样的收缩变形, 至此试样经历了第一次湿干循环。在干燥过程中, 与以往研究不同的是, 本次试验采取了两种干缩路径: 全干燥和部分干燥, 以便模拟两种不同气候条件下膨胀土的胀缩行为。全干燥是指将试样干燥至缩限, 直到试样的高度

和含水率不再变化为止, 对应一种极端的持续干旱气候; 部分干燥是指将试样干燥到特定的高度或含水率, 本文设计为将试样干燥到初始高度, 对应一种短期的干旱气候。当试样收缩达到控制标准后, 再重复上述的吸湿膨胀试验, 如此往复, 共进行了 6 次循环, 历时约 6 个月。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 控制吸力干湿循环试验结果

#### (1) 土水特征曲线

在控制吸力条件下, 本文共对 2 个平行样开展了干湿循环试验, 结果如图 1 所示。图 1(a) 给出了试样含水率随吸力的变化, 即土水特征曲线。从图中可以看出, 在脱湿过程中, 随着吸力的增加, 试样含水率逐渐减小, 减小过程大体可分为 3 个阶段: 迅速变化阶段 ( $s=0.4\sim 9$  MPa)、过渡阶段 ( $s=9\sim 82$  MPa) 和缓慢变化阶段 ( $s=82\sim 262$  MPa)。在 0.4~9 MPa 吸力范围内, 含水率的减幅非常明显, 从初始的 31% 迅速降到 16.5%; 在 9~82 MPa 吸力范围内, 含水率变化经历了一个过渡阶段, 变化速率逐渐变缓, 从 16.5% 降到 8.5%; 当吸力超过 82 MPa 时, 含水率随吸力的增加几乎呈水平线性减小, 变化非常缓慢, 当吸力达到 262 MPa 时, 试样的最终平衡含水率为 3%。在随后的吸湿过程中, 含水率随吸力的减小呈递增趋势, 其变化规律与脱湿过程相似, 也可分为 3 个阶段, 各个阶段对应的吸力范围也与脱湿过程基本一致。

从图 1(a) 还可以看出, 在吸湿过程中, 吸力小于 113 MPa 之前, 试样的土水特征曲线几乎与脱湿过程重合, 说明高吸力 (113~262 MPa) 条件下含水率变化是可逆的。当吸力小于 113 MPa 之后, 两条曲线之间出现明显的滞后效应, 即在相同的吸力条件下, 试样在吸湿过程中的含水率均小于脱湿过程, 且含水率差异随吸力的减小而增大, 0.4 MPa 时差值最大, 为 5%。

#### (2) 体变特征曲线

图 1(b) 中给出了试样在干湿循环过程中孔隙比随吸力的变化, 即体变特征曲线。从图上可以看出, 体变特征曲线与图 1(a) 中的土水特征曲线有相似的变化规律, 也分为 3 个阶段, 对应的吸力范围也基本一致。具体而言, 在脱湿过程中, 由于试样失水收缩, 孔隙比随吸力的增加而不断减小。当吸力从 0.4 MPa 增加到 262 MPa 时, 孔隙比从 0.85 减小到 0.39, 体积收缩量达 52%。森茂田等 (2008)<sup>[24]</sup> 在研究非饱和重塑土的收缩特征时也得到了相似的结果, 他们根据所确定的屈服吸力和缩限吸力将试样的收缩过程分为弹

性、弹塑性和缩限3个阶段。在吸湿过程中, 由于水

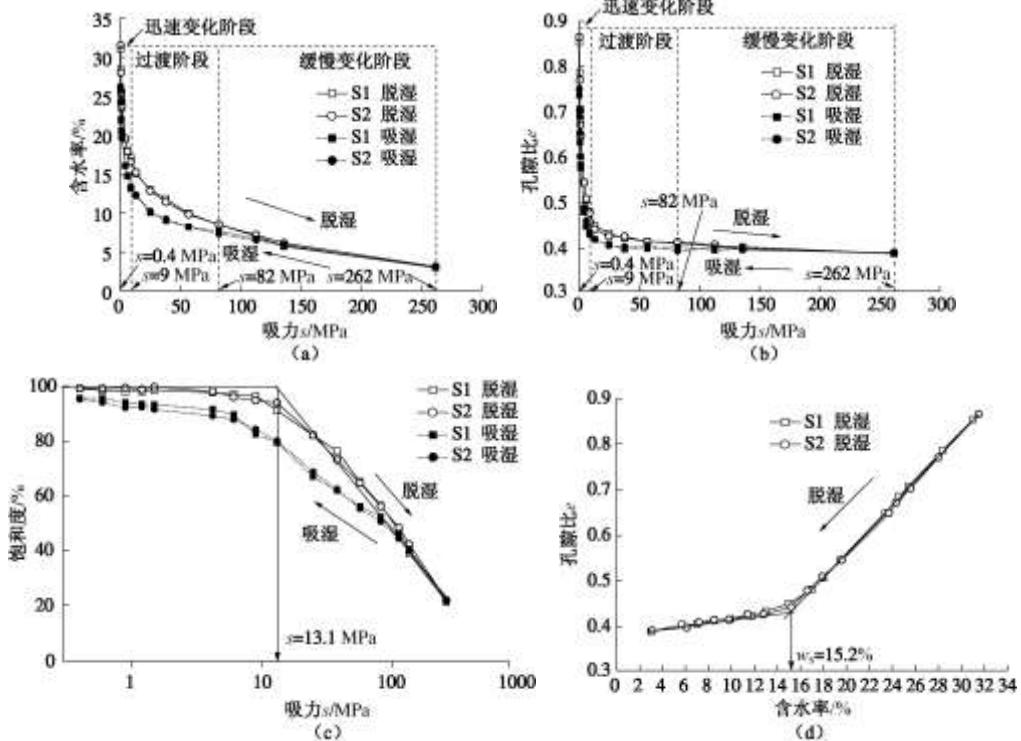


图1 控制吸力干湿循环试验结果

Fig. 1 Results of suction-controlled wetting-drying tests

减小到0.4 MPa时, 孔隙比从0.39恢复到0.73, 但比初始值0.85低14%。该结果说明试样在干湿循环过程中体积胀缩变形并不完全可逆, 图1(b)中两条曲线间的滞回圈也直观描述了这一现象。

为了定量描述试样在干湿循环过程中胀缩变形的不可逆程度及其与吸力的关系, 本文引入了体变不可逆系数的概念, 定义如下:

$$\lambda = \frac{e_d - e_w}{1 + e_0} \times 100\% \quad . \quad (1)$$

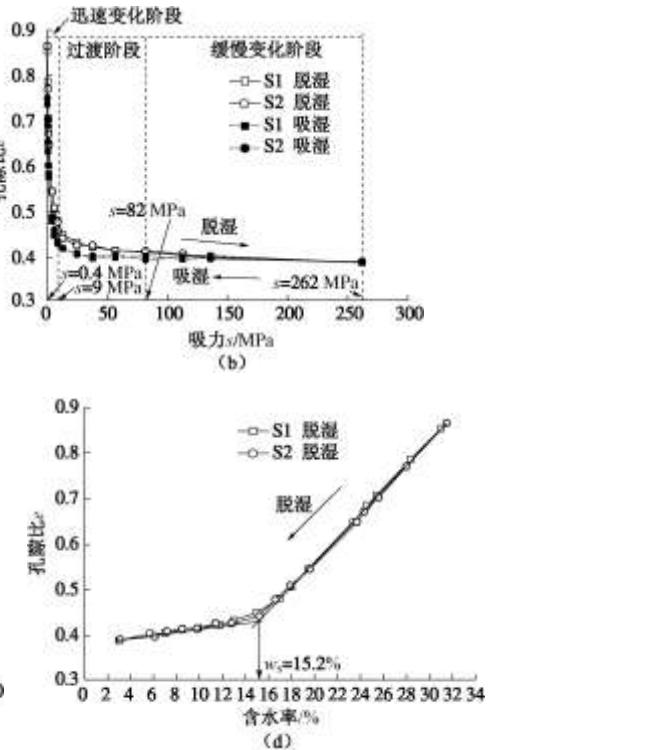
式中  $e_d$  和  $e_w$  分别为试样在脱湿和吸湿过程中某吸力条件下对应的孔隙比;  $e_0$  为试样的初始孔隙比, 取值为0.85。将图1(b)的结果代入式(1), 得到每一级吸力条件下试样体积的不可逆系数, 如图2所示。从图中可以看出,  $\lambda$  随吸力  $s$  的增加呈指数递减关系, 对应关系式为

$$\lambda = 5.8 \times \exp(-s/19.4) + 0.5 \quad , \quad (2)$$

吸力越小, 对应  $\lambda$  越大, 说明试样在干湿循环过程中体变不可逆程度越显著; 反之, 吸力越大, 对应  $\lambda$  越小, 说明试样体变的可逆程度越高。如吸力大于113 MPa时,  $\lambda < 1\%$ , 图1(b)中的两条曲线基本重合, 表现出较好的可逆特征。

膨胀土体积变形的不可逆现象主要与干湿循环过程中土体微观结构变化有关。在施加吸力(脱湿)之前, 试样的初始含水率为33%, 孔隙比接近0.9, 结

分进入土体中, 试样发生膨胀变形, 当吸力从262 MPa



构相对比较松散。在这种状态下, 试样中黏土颗粒的排列形式一般以边-面接触为主, 颗粒之间的夹角较大<sup>[25]</sup>。但随着吸力的增加, 颗粒间的水分和距离逐渐减小, 有效应力逐渐增加, 大孔隙发生压缩塌陷, 土颗粒从边-面接触向面-面接触过渡, 颗粒间的夹角变小, 定向性增强, 这在宏观上即表现为试样的体积收缩。由于该过程中黏土颗粒的位置和排列方式均发生了较大的变化, 这种结构上的改变在一定程度上是不可逆的, 从而导致试样在随后的吸湿过程中, 含水率和孔隙比均无法恢复到先期水平。

随着吸力的进一步增加, 土颗粒的排列形式逐渐以面-面接触为主要形式, 此时试样的微观结构相对比较稳定, 吸力的持续增加主要导致相互平行颗粒间距减小, 孔隙比变化不如之前明显。在随后的吸湿过程中, 水分能再次进入平行的颗粒之间, 增加土颗粒的间距, 这解释了试样在高吸力条件下胀缩变形基本可逆、体变不可逆系数相对较小的现象。此外, Cui等(2002)<sup>[26]</sup>在控制吸力条件下(从57 MPa到0), 采用扫描电镜研究了土体在吸湿过程中的微观结构特征, 他们发现吸力低于1 MPa之前, 试样的微观结构变化并不明显, 当吸力从1 MPa逐渐减小到0时, 试样的孔隙尺寸显著增加, 孔径的分布特征和黏土颗粒的形状有显著改变, 这与图1(b)中试样的孔隙比在低吸力区间内变化幅度较大实际上是一致的。

### (3) 饱和度与收缩特征曲线

图 1(c) 给出了试样干湿循环过程中饱和度随吸力的变化, 从脱湿曲线上可以大致确定本文所研究膨胀土的进气值约为 13.1 MPa。当吸力达到 262 MPa 时, 试样的饱和度仍然高达 22%, 说明该土样的塑性较高, 与表 1 中测得的高塑性指数 (38.4%) 吻合。

图 1(d) 给出了试样在脱湿过程中孔隙比随含水率的变化, 即收缩特征曲线。从图上可以看出, 在脱湿初始阶段, 孔隙比随含水率呈线性减小关系, 理论上试样处于饱和状态, 体积收缩量与失水体积相等<sup>[27]</sup>。随着干燥的继续, 孔隙比的变化速率逐渐减缓, 体积收缩量小于失水体积, 试样变为非饱和状态。此外, 从收缩曲线上可大致确定本文所研究土样的缩限含水率为 15.2%。

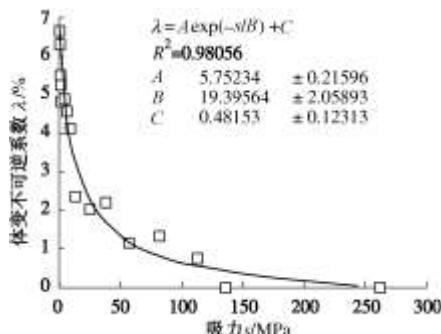


图 2 控制吸力干湿循环过程中试样胀缩应变差与对应吸力的关系

Fig. 2 Relationship between swelling-shrinkage strain difference and corresponding suction of specimen in suction-controlled wetting-drying tests

### 3.2 常规干湿循环试验结果

#### (1) 轴向应变随干湿循环次数的变化

根据千分表的读数, 将试样在浸水 - 干燥循环试验中发生的轴向应变 (轴向变形量与试样初始高度之比) 绘于图 3 中。

对于全干燥试验, 由图 3(a) 的轴向应变结果可知, 试样在浸水膨胀后的最终高度随循环次数先增加后减小, 在第 2 次循环过程中达到峰值, 试样在 40 ℃ 条件下干燥后的最终高度随循环次数的增加而增加, 大约经过 5~6 次干湿循环后, 试样的最终应变基本趋于稳定。图 3(a) 中还给出了每次循环结束后测得的试样含水率, 膨胀结束后试样的含水率变化范围为 26.5%~29.9%, 变化规律与轴向应变基本一致。干燥结束后试样的含水率波动范围很小, 为 3.3%~3.7%, 这主要是因为试样的干燥环境比较稳定。

对于部分干燥试验, 结果如图 3(b) 所示。在第一次浸水平衡后, 试样的轴向应变和含水率达到最大值, 分别为 12.4% 和 28.3%。此后, 随循环次数的增

加, 轴向应变和含水率逐渐减小, 并最终趋于稳定。在干燥过程中, 当试样收缩到初始高度后, 对应的含水率变化相对比较稳定, 主要在 22%~24% 范围内波动。

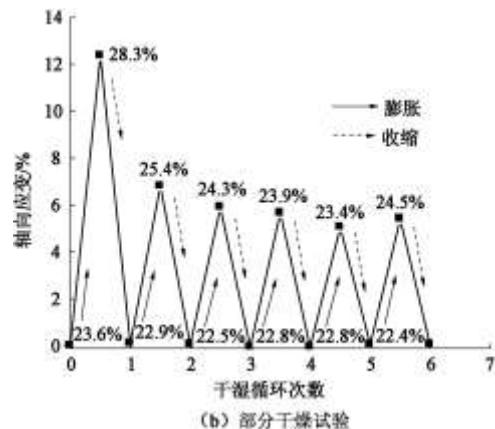
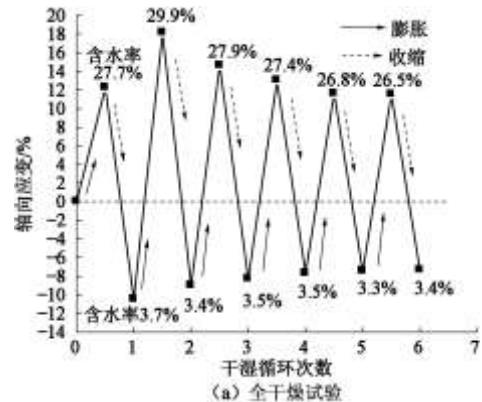


图 3 常规干湿循环试验中试样轴向应变

Fig. 3 Axial deformation of specimen in conventional wetting-drying tests

#### (2) 膨胀率随干湿循环次数的变化

为进一步定量分析试样在干湿循环过程中的胀缩变形规律, 本文引入 4 个变量, 分别为绝对膨胀率  $\delta_a$ 、相对膨胀率  $\delta_r$ 、绝对收缩率  $\eta_a$  和相对收缩率  $\eta_r$ , 定义如下<sup>[2, 4, 7]</sup>:

$$\delta_a = \frac{h_w - h_0}{h_0} \times 100\% , \quad (3)$$

$$\delta_r = \frac{h_w - h_i}{h_i} \times 100\% , \quad (4)$$

$$\eta_a = \frac{|h_d - h_0|}{h_0} \times 100\% , \quad (5)$$

$$\eta_r = \frac{|h_d - h_i|}{h_i} \times 100\% . \quad (6)$$

式中  $h_0$  为试样的初始高度;  $h_w$  和  $h_d$  分别为试样膨胀和收缩稳定后的高度;  $h_i$  为试样某次胀缩循环前的高度。

度。表 3 总结了试样在每次干湿循环过程中上述 4 个变量的计算结果。

表 3 试样在常规干湿循环试验中的胀缩率

Table 3 Swelling and shrinkage percentage of specimen in conventional wetting-drying tests

试验条件	干湿循环次数	绝对膨胀率 $\delta_a\%$	相对膨胀率 $\delta_r\%$	绝对收缩率 $\eta_a\%$	相对收缩率 $\eta_r\%$
全干燥	1	12.3	12.3	10.5	20.3
	2	18.2	32.0	9	22.9
	3	14.6	25.9	8.3	19.9
	4	13.1	23.3	7.7	18.4
	5	11.6	20.9	7.5	17.1
	6	11.5	20.5	7.4	16.9
部分干燥	1	12.4	12.4	0	10.9
	2	6.8	6.7	0	6.3
	3	5.9	5.8	0	5.6
	4	5.7	5.7	0	5.4
	5	5.1	5.1	0	4.6
	6	5.4	5.3	0	5.1

图 4 给出了试样绝对和相对膨胀率随干湿循环次数的变化规律。从图 4 (a) 可以看出, 全干燥试验过程中, 试样的绝对膨胀率均小于相对膨胀率, 且都在第 2 次循环中达到最大值, 分别为 18.2% 和 32.0%, 此后, 试样的膨胀率随循环次数的增加而减小, 并在第 5 次和第 6 次循环中达到平衡。

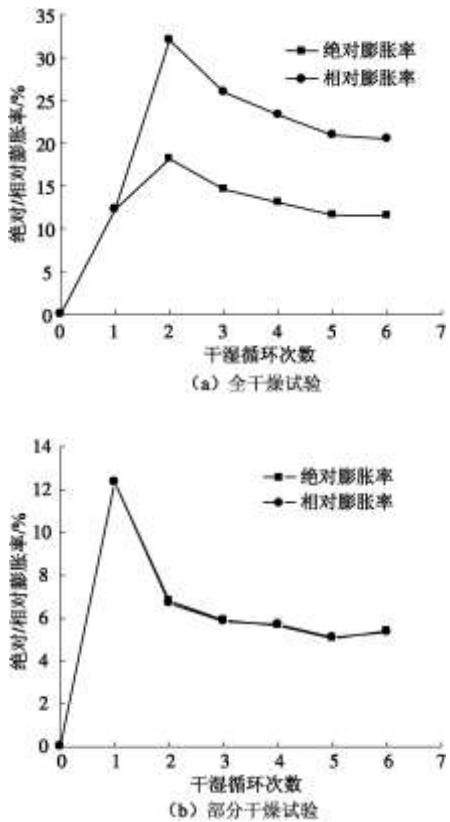


图 4 全干燥和部分干燥试验中试样膨胀率随循环次数的变化

Fig. 4 Variation of swelling percentage with wetting-drying cycles in full and partial shrinkage tests

对于部分干燥试验, 由于每次干燥过程中试样都

收缩到初始高度, 因此式 (4) 中的  $h_i$  等于式 (3) 中的  $h_0$ , 理论上试样的绝对膨胀率和相对膨胀率相等, 但在实际操作过程中, 由于试样的收缩高度难于精确控制, 可以发现图 4 (b) 中的两条曲线并不完全重合。与全干燥试验不同的是, 部分干燥试验中试样的膨胀率在第 1 次循环中达到最大值, 此后逐渐减小并趋于稳定。尤其在第 2 次循环中, 试验的膨胀率较前一次减小非常明显, 减幅达 45%, 该现象与 Basma 等(1996)<sup>[8]</sup>的试验结果相似。除此之外, 从图 4 和表 3 中还可以看出, 除第 1 次循环外, 部分干燥试验中试样在各级循环条件下的膨胀率均小于全干燥试验。以第 6 次循环中的绝对膨胀率为例, 部分干燥试验为 5.4%, 全干燥试验为 11.5%, 后者为前者的 2.1 倍。

对于给定的土体而言, 膨胀率的大小与土体的初始状态密切相关。一般情况下, 初始干密度越大, 初始含水率越小, 膨胀率越大<sup>[28]</sup>。全干燥试验中, 试样在第 2 次循环中获得最大的膨胀率, 主要与试样在浸水前含水率低、干密度大有关。结合图 3 中含水率和图 4 的膨胀率结果, 还可以发现: 干湿循环过程中试样膨胀率与吸湿(水)能力成正比。

### (3) 收缩率随干湿循环次数的变化

图 5 给出了试样绝对收缩率和相对收缩率随干湿循环次数的变化规律。从图上可以看出, 试样的相对收缩率均高于绝对收缩率。对全干燥试验而言(图 5 (a)), 试样的绝对收缩率在第 1 次循环中达到最大值 10.5%, 然后逐渐减小, 在第 5 次循环后基本达到平衡。而相对收缩率的变化规律与图 4 (a) 中的膨胀率一致, 呈先增加后减小的趋势, 并在第 2 次循环中达到峰值 22.9%。对部分干燥试验而言(图 5 (b)), 绝对收缩率基本接近于零, 相对收缩率随循环次数的增加而减小, 在第 2 次循环中减幅最大, 达 42%, 此后减幅相对较小, 如第 6 次循环中的相对收缩率只比第 2 次循环低 19%。

根据图 5 (a) 的绝对收缩率计算结果可知, 试样干燥后的高度随循环次数的增加有递增趋势, 如第 6 次干燥后试样的高度比第 1 次高 0.63 mm, 说明试样在干湿循环过程中发生了不可逆的体积变形, 这与其他许多学者得到的结果一致<sup>[2, 4, 7]</sup>。Zemenu 等(2009)<sup>[29]</sup>采用扫描电镜和压汞试验研究了膨胀土经过多次干湿循环后的微观结构变化, 他们发现: 随着干湿循环次数的增加, 试样的孔隙率和孔径均逐渐变大, 尤其是 0.1~5 μm 范围内的孔径变化最明显。

### (4) 膨胀速率随干湿循环次数的变化

图 6 给出了试样在干湿循环过程中相对膨胀率随时间的变化规律。对全干燥试验而言(图 6 (a)), 随

干湿循环次数的增加,试样的膨胀速率有递增的趋势,膨胀到稳定所需时间越来越短,这与刘松玉等(1999)<sup>[7]</sup>和Zemenu等(2009)<sup>[29]</sup>的研究结果一致。主要是因为试样在干燥过程中内部产生了收缩裂隙,渗透性增加,浸水饱和时间缩短。卢再华等(2002)<sup>[2]</sup>采用CT技术研究了南阳重塑膨胀土在干湿循环过程中收缩裂隙的演化规律,证实了土样中裂隙的数量和连通性随干湿循环次数的增加而增加。

对部分干燥试验而言(图6(b)),除了第1次循环中试样达到膨胀平衡所需时间较长外,其它几次循环中试样的膨胀速率基本一致,受循环次数的影响不明显。这可能是因为部分干燥试验中试样在较高含水率(22%~24%,图1(b))时就停止了干燥,试样中还没有产生收缩裂隙,渗透性变化不大。

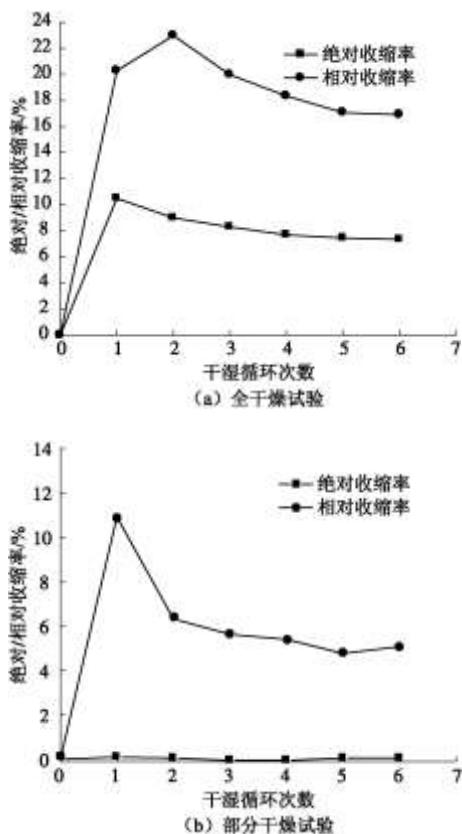


图5 全干燥和部分干燥试验中试样收缩率随循环次数的变化

Fig. 5 Variation of shrinkage percentage with wetting-drying cycles in full and partial shrinkage tests

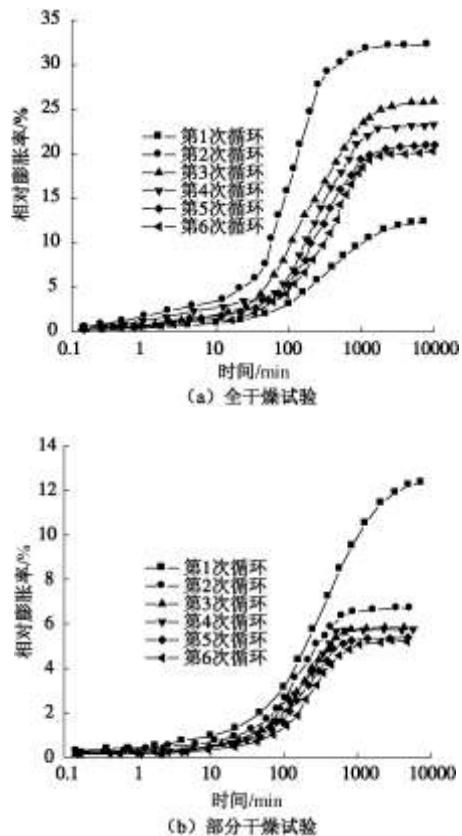


图6 全干燥和部分干燥试验中试样相对膨胀率随时间的变化

Fig. 6 Variation of relative swelling percentage with time in full and partial shrinkage tests

## 4 结 论

(1)无论是在控制吸力还是常规干湿循环过程中,膨胀土的胀缩变形并不完全可逆;在常规干湿循环试验中,试样经历5~6次干湿循环后胀缩变形基本趋于稳定。

(2)控制吸力条件下,膨胀土在脱湿和吸湿过程中的含水率和孔隙比随吸力变化可分3个典型阶段:大幅变化阶段、过渡阶段和缓慢变化阶段,对应的吸力变化范围分别为0.4~9 MPa、9~82 MPa和82~262 MPa。

(3)膨胀土的持水特性和胀缩性在高吸力(113~262 MPa)范围内基本可逆,而在低吸力(0.4~113 MPa)范围内则表现出明显的不可逆性,其不可逆程度随吸力的减小呈指数增加,最大体变不可逆系数达7%。

(4)常规干湿循环过程中,干缩路径对膨胀土的胀缩特征有重要影响。全干缩路径中,绝对膨胀率、相对膨胀率和相对收缩率均呈先增加后减小的趋势,并在第2次循环中达到峰值,而绝对收缩率在第1次循环中最大,此后逐渐减小;部分干缩路径中,由于

控制试样在每次循环中都只干燥到初始高度, 测得绝对膨胀率和相对膨胀率相等, 二者与相对收缩率均随循环次数的增加而减小。

(5) 在第2~6次干湿循环过程中, 全干缩路径中测得的膨胀土膨胀率均比部分干缩路径高, 其中绝对膨胀率平均高出137%, 相对膨胀率平均高出313%; 试样的膨胀率大小与吸湿能力成正比。

(6) 随干湿循环次数的增加, 全干缩路径中膨胀土的膨胀速率有递增趋势, 该现象在部分干缩路径中不是很明显。

## 参考文献:

- [1] 刘祖德, 孔官瑞. 平面应变条件下膨胀土卸荷变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(2): 68~73. (LIU Zu-de, KONG Guan-rui. Study on unloading deformation of expansive soil under plane strain condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(2): 68~73. (in Chinese))
- [2] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 膨胀土干湿循环胀缩裂隙演化的CT试验研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(4): 417~422. (LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, PU Yi-bin. A CT study on the crack evolution of expansive soil during drying and wetting cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(4): 417~422. (in Chinese))
- [3] ALBRECHT B A, BENSON C H. Effect of desiccation on compacted natural clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(1): 67~75.
- [4] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 1936~1941. (YANG He-ping, ZHANG Rui, ZHENG Jian-Long. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 1936~1941. (in Chinese))
- [5] OSIPOV V I, BIK N N, RUMJANTSEVA N A. Cyclic swelling of clays[J]. Appl Clay Sci, 1987, **2**(7): 363~374.
- [6] DAY R W. Swell-shrink behavior of compacted clay[J]. ASCE, J Geotech Eng Div, 1994, **120**(3): 618~623.
- [7] 刘松玉, 季鹏, 方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(1): 9~13. (LIU Song-yu, JI Peng, FANG Lei. Approach to cyclic swelling behavior of compacted expansive clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 9~13. (in Chinese))
- [8] BASMA A A, AL-HOMOUD A S, MALKAWI A I H, AL-BASHABSHEH M A. Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays[J]. Applied Clay Science, 1996, **11**: 211~227.
- [9] DIF A E, BLUMEL W F. Expansive soils under cyclic drying and wetting[J]. Geotechnical Testing Journal, 1991, **14**: 96~102.
- [10] ALONSO E E, ROMERO E, HOFFMANN C, et al. Expansive bentonite/sand mixtures in cyclic controlled suction drying and wetting[J]. Engineering Geology, 2005, **81**: 213~226.
- [11] ALONSO E E. Modelling expansive soil behaviour[C]// Proceedings of 2nd International Conference On Unsaturated Soils. Beijing, 1998, **2**: 37~70.
- [12] LEONG E C, HE L, RAHARDJO H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, **25**(3): 1~11.
- [13] LAGERWERFF J V, OGATA G, EAGLE H E. Control of osmotic pressure of culture solutions with polyethylene glycol [J]. Science, 1961, **133**: 1486~1487.
- [14] KASSIF G, BEN SHALOM A. Experimental relationship between swell pressure and suction[J]. Géotechnique, 1971, **21**(3): 245~255.
- [15] DELAGE P, SILVA S D, LAURE G P R D. Un nouvel appareil triaxial pour les sols nonsatures[C]// Proceedings of the 9th European Conference on soil mechanics and foundation Engineering. Dublin, 1987, **1**: 25~28.
- [16] TARANTINO A, MONGIOVI L. A study of the efficiency of semipermeable membranes in controlling soil matrix suction using the osmotic technique[C]// Unsaturated Soils for Asia, 303~308, Toll and Leong eds, Balkema, 2000.
- [17] CUISINIER O, MASROURI F. Hydromechanical behaviour of a compacted swelling soil over a wide suction range[J]. Engineering Geology, 2005, **81**: 204~212.
- [18] MONROY R, RIDLEY A, DINEEN K, ZDRAKOVIC L. The suitability of osmotic technique for the long term testing of partly saturated soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, **30**(3): 220~226.
- [19] 叶为民, 唐益群, 崔玉军. 室内吸力量测与上海软土土水特征[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(3): 347~349. (YE Wei-ming, TANG Yi-qun, CUI Yu-jun. Measurement of soil suction in laboratory and soil-water characteristics of Shanghai soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(3): 347~349. (in Chinese))

- [20] DELAGE P, CUI Y J. An evaluation of the osmotic method of controlling suction[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2008, **3**(1): 1 – 11.
- [21] PERON H, HUECKEL T, LALOUI L. An improved volume measurement for determining soil water retention curve[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, **30**(1): 1 – 7.
- [22] DELAGE P, HOWAT M, CUI Y J. The relationship between suction and swelling properties in a heavily compacted unsaturated clay[J]. Engineering Geology, 1998, **50**(1-2): 34 – 48.
- [23] TANG A M, CUI Y J. Controlling suction by the vapour equilibrium technique at different temperatures and its application in determining the water retention properties of MX80 clay[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(1): 287 – 296.
- [24] 栾茂田, 汪东林, 杨 庆, 等. 非饱和重塑土的干燥收缩试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(1): 118 – 122. (LUAN Mao-tian, WANG Dong-lin, YANG Qing, et al. Experimental study on drying shrinkage of unsaturated compacted soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical
- Engineering Journal, 2008, **30**(1): 118 – 122. (in Chinese))
- [25] CUI Y J, MANTHO A T, CUI K, AUDIGUIER M. Water retention properties and volume change behaviour of natural Romainville clay[C]// Proc of the 3rd International Conference on Unstaturated Soils UNSAT2006. 2006: 873 – 882.
- [26] CUI Y J, LOISEAU C, DELAGE P. Microstructure changes of a confined swelling soil due to suction controlled hydration[C]// Proc of the 3rd International Conference on Unstaturated Soils UNSAT2002. Recife, 2002, **2**: 593 – 589.
- [27] CORNELIS W M, CORLUY J, MEDINA H, et al. Measuring and modeling the soil shrinkage characteristic curve[J]. Geoderma, 2006, **137**: 179 – 191.
- [28] VILLAR M V, LLORET A. Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 2008, **39**: 38 – 49.
- [29] ZEMENU G, MARTINE A, ROGER C. Analysis of the behaviour of a natural expansive soil under cyclic drying and wetting[J]. Bull Eng Geol Environ, 2009, **68**: 421 – 436.

## 第八届全国工程排水与加固技术研讨会第 2 号通知

“十二五”期间,交通、水利等行业重大工程的建设将进入了一个崭新的发展阶段,为加强工程排水与地基加固领域的学术交流,中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会将于 2011 年 11 月 11 日~13 日在福建省福州市举办第八届全国工程排水与加固技术研讨会,会议由福建省建筑科学研究院承办。

本次会议将以特邀报告、主题报告和分组讨论等形式探讨工程排水与加固领域的热点和难点问题,交流大面积围海造陆技术、超软地基加固技术、土工合成材料的应用与发展等方面取得的新进展、新经验和新理念,讨论如何进一步发展和提高

我国工程排水与加固的技术水平,更好地为工程建设服务。欢迎各界人士参加本次会议,并请参加会议的代表于 10 月 20 日前向学会秘书处报名。

会议联系人:关云飞、李东兵;联系电话:025-85829503,025-85829500,传真:025-85829555;地址:南京市虎踞关 34 号南京水科院岩土工程研究所(210024);会议邮箱:PSJG2011@163.com。

会议期间将组织工程考察和技术展览,热忱欢迎从事工程排水与加固领域新材料、新设备的研发与生产的相关单位踊跃报名参加。

(中国土木工程学会港口工程学会工  
程排水与加固专业委员会秘书处 供稿)