

文章编号:1673-2049(2018)03-0016-09

# 干湿循环与荷载耦合作用下红黏土胀缩特性

陈开圣, 李 振

(贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**为获取符合工程设计的实际参数,对常规固结仪进行了改造,提出了一种模拟土体在荷载作用下的干湿循环试验方法,对红黏土进行了有荷载条件模拟干湿循环过程的试验研究,得到其胀缩变形的变化规律。结果表明:该方法可以实现不拆卸试样干湿循环试验,克服了以前荷载为0的土体干湿循环试验的缺陷,为工程设计提供更加合理的技术指标;干湿循环下红黏土的胀缩变形不能完全恢复,上覆荷载可以抑制其膨胀性,增强其收缩性;荷载小于50 kPa时,试样膨胀,且压实度越大和初始含水率越小,膨胀性越强;荷载大于100 kPa时,试样收缩,压实度越小和初始含水率越大,收缩性越强;第1次干湿循环对红黏土胀缩性能影响最为显著,随着干湿循环次数的增加,胀缩率曲线越来越平缓,胀缩性能趋于稳定状态。

**关键词:**干湿循环;荷载;红黏土;胀缩特性;耦合作用

**中图分类号:**TU446

**文献标志码:**A

## Swelling-shrinking Characteristics of Red Clay Under Coupling Effect of Dry-wet Cycles and Loading

CHEN Kai-sheng, LI Zhen

(College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** In order to obtain the actual parameters conforming to the engineering design, the conventional consolidation apparatus was reconstructed. A new dry-wet cycle test method of simulating soil under load was invented. The dry-wet cycle experimental research of red clay was carried out under load conditions, and the change rule of swelling-shrinkage deformation of red clay was obtained. The results show that the method can realize the dry-wet cycle test without disassembly, and overcome the defects of the dry-wet cycle test of soil with zero load. The method can provide more reasonable technical indicators for engineering design. The swelling-shrinkage deformation of red clay under dry-wet cycle cannot be fully recovered, and the overlying load can restrain its expansibility and enhance its shrinkage. When the load is less than 50 kPa, the sample expands, and the greater the compaction degree and the smaller the initial moisture content, the stronger the swelling. When the load is more than 100 kPa, the sample shrinks, and the smaller the compaction degree and the greater the initial moisture content, the stronger the shrinkage. The first wet-dry cycle has the most significant effect on the swelling-shrinking characteristics of red clay. The swelling-shrinking curve becomes more and more gentle with the increase of the number of dry-wet cycles, and the swelling-shrinking characteristics of

收稿日期:2017-11-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51368010,51668011);贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2016]2005);

贵州省科技厅-贵州大学联合基金项目(黔科合 LH 字[2014]7663);贵州大学研究生创新基金项目(研理工 2017032)

作者简介:陈开圣(1975-),男,湖南洞口人,教授,工学博士,E-mail:32084046@qq.com.

the sample tend to be stable.

**Key words:** dry-wet cycle; loading; red clay; swelling-shrinking characteristic; coupling effect

0 引言

红黏土是中国西南部广泛分布的一种特殊土,具有对环境湿度变化敏感、多裂缝、强胀缩和强度易衰减等特性,在干湿循环与荷载共同作用下大量以红黏土作为基础的构筑物会发生破坏,损失巨大。近几年来,随着高速公路、高速铁路向西南部延伸,遇到的红黏土问题也越来越多,人们开始研究干湿循环下红黏土的各种特性,并取得了一定成果<sup>[1-8]</sup>。前人研究成果基本上都是在荷载为 0 的条件下进行干湿循环,这与实际情况不符。杨和平等<sup>[9]</sup>利用加浴霸的轻型固结仪对原状膨胀土进行了有荷条件下

的干湿循环试验研究,张文慧<sup>[10]</sup>利用温控气压固结仪对原状膨胀土进行了有荷条件下干湿循环试验研究,对干湿循环与荷载共同作用下红黏土胀缩特性研究仍然较少,基于此,本文采用固结仪对重塑红黏土进行了有荷作用下干湿循环试验,获得了荷载作用下红黏土的胀缩性能变化规律,为工程实践提供相关参考。

1 土样基本物理性质指标

本文试验所用的红黏土取自贵州省贵州大学西校区教学楼建设工地,土样呈红褐色,稍湿,无植被掺杂,裂隙不发育。土样基本物理性质指标见表 1。

表 1 红黏土基本物理性质指标

Tab. 1 Basic Physical Property Indexes of Red Clay

最佳含水率/ 率/%	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	相对密度	塑限/%	液限/%	塑性指数/%	不均匀 系数	曲率系数	不同粒径(mm)的颗粒所占比例/%		
								<0.002	0.002~0.075	>0.075
24.6	1.61	2.72	25.2	43.6	18.4	9.38	1.6	11.34	71.41	17.25

2 试验方案

2.1 试样制备

采用静力压实法制备环刀试样,试样直径为 79.8 mm,高度为 20 mm。初始含水率分别为 30%,24.6%,20%,压实度  $k$  分别为 96%,90%,80%,共 9 组 36 个试样。

2.2 荷载作用下干湿循环试验

荷载作用下干湿循环试验方法见图 1。



图 2 改进试验装置照片

Fig. 2 Photo of Improved Test Setup

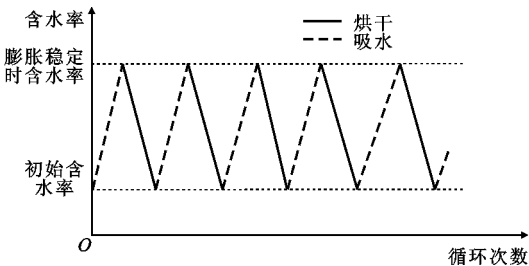


图 1 干湿循环试验

Fig. 1 Dry-wet Cycle Test

改进试验装置见图 2,3。本文荷载与干湿循环共同作用下红黏土胀缩试验在改进的固结仪上进行,整个试验过程不拆卸试样,避免对试样的扰动。改进的试验装置在试验过程中具体应用分 3 个部分完成:

(1)固结过程。将同一压实度的 4 个试样置入

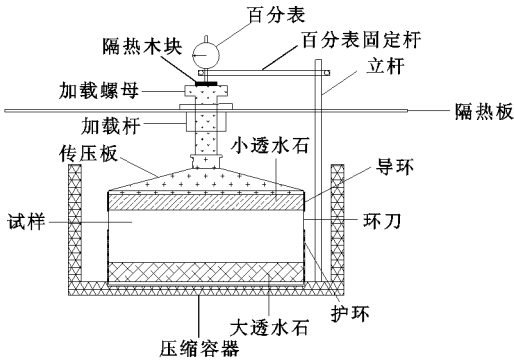


图 3 改进试验装置示意

Fig. 3 Schematic Diagram of Improved Test Setup

固结仪中,分别施加上覆荷载 0,50,100,200 kPa,试样完成固结后记录百分表读数,并以固结后试样

高度作为干湿循环前试样的初始高度。固结试验过程的荷载施加主要是通过固结仪加载托盘将荷载通过反向力经由图 3 中的加载杆和加载螺母对试样施加垂直压力。

(2)浸水膨胀过程。通过向固结仪压缩容器内加水直至水面与压缩容器上口齐平,水分经由护环底部与压缩容器之间的缝隙和进水口,以及传压板与导环之间的缝隙被试样上下部分别放置的大透水石和小透水石吸收,大透水石和小透水石吸收的水分会沿透水石从试样底部和顶部均匀渗入试样,致使试样吸水膨胀,试样吸水膨胀直至变形稳定,并记录膨胀过程中每小时百分表读数。根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)设定膨胀稳定标准为 2 h 百分表读数不超过 0.01 mm。

(3)烘干至初始含水率过程。试样膨胀稳定后,将固结仪压缩容器中多余水抽出,并用透水性较低的黏土将压缩容器与护环底部的缝隙和进水口密封,然后将酒精倒入压缩容器并使酒精量不高于导环,以避免酒精由导环与传压板之间的缝隙进入试样,造成误差。之后点燃酒精加热,由于酒精燃烧产

生高温,经由护环、环刀和导环 3 个金属部件对试样形成高温环境包围,试样水分由于高温环绕而非局部受热,便会从试样中沿传压板与导环之间的缝隙逸出,试样失水收缩,直至烘干到初始含水率状态,完成 1 次循环,并记录过程中每小时百分表读数。整个试验过程中,在原有固结仪上添置百分表隔热铁皮和隔热木块,以避免酒精加热烘干过程中高温对百分表的损坏。

浸水膨胀稳定时间和烘干至初始含水率时间经反复试验确定,即在正式试验开始之前进行预备组试样的试验,在吸水膨胀过程中不同时间点取出试样称重,直至试样质量不再增加,则完成吸水膨胀过程,并记下吸水膨胀的时间  $t$ ; 同样,加热烘干过程中不同时间点取出试样称重,直至试样质量等于试样的初始质量  $m$ ,则完成烘干过程,并记下烘干的时间  $T$ ,试验结果见表 2。按照表 2 确定的不同压实度和初始含水率试样吸水膨胀和高温烘干的时间开展试验,即可初步实现不拆卸试样进行荷载与干湿循环共同作用下红黏土的胀缩特性试验。然后依此方法完成 5 次荷载作用下的干湿循环试验。

表 2 干湿循环时间  
Tab. 2 Time of Dry-wet Cycle

初始含水率/%		30.0			24.6			20.0		
压实度/%		96	90	80	96	90	80	96	90	80
第 1 次干湿循环	浸水时间/h	12	10	10	12	12	10	12	12	10
	烘干时间/min	15	17	25	35	33	45	45	40	50
以后每次干湿循环	浸水时间/h	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	烘干时间/min	15	17	25	35	33	45	45	40	50

2.3 试验指标

试验过程中采用胀缩率来表征试样的膨胀、收缩特性与时间的关系,胀缩率大于 0 表示膨胀,小于 0 表示收缩。绝对胀缩率和相对胀缩率是干湿循环次数中某个循环节点的值,该值用来表征试样的胀缩量、胀缩速率与循环次数的关系,如式(1)~(3)所示

$$\delta_z = \frac{h_i - h_0}{h_0} \times 100\%$$
(1)

$$\delta_a = \frac{h_{pi} - h_0}{h_0} \times 100\%$$
(2)

$$\delta_r = \frac{h_{pi} - h_{p(i-1)}}{h_{p(i-1)}} \times 100\%$$
(3)

式中: $\delta_z$  为胀缩率; $\delta_a$  为绝对胀缩率; $\delta_r$  为相对胀缩率; $h_i$  为循环过程中任意时刻的试样高度; $h_0$  为试样的初始高度; $h_{pi}$  为第  $i$  次干湿循环完成节点的试样高度; $h_{p(i-1)}$  为第  $i-1$  次干湿循环完成节点的试

样高度。

3 结果分析

限于篇幅,以最优初始含水率 24.6% 和不同压实度试样为例,分析试样胀缩率、绝对胀缩率、相对胀缩率与时间和循环次数的关系。

3.1 胀缩率与时间的关系

3.1.1 不同荷载下试样胀缩率与时间关系

图 4 给出了不同荷载下试样胀缩率随时间的变化关系。由图 4 可知:

(1)上覆荷载  $p$  为 0 kPa 和 50 kPa 时,干湿循环下红黏土胀缩率大于 0,试样膨胀。荷载越大,胀缩率越小,说明增大上覆荷载可以抑制红黏土的胀缩性能。

(2)上覆荷载为 100 kPa 和 200 kPa 时,干湿循环下红黏土胀缩率小于 0,试样收缩。荷载越大,胀

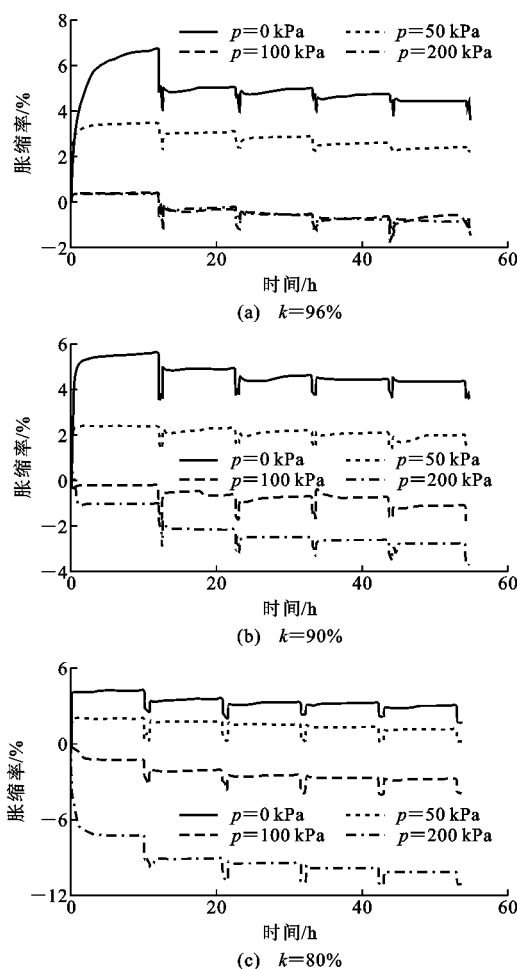


图4 不同荷载下试样胀缩率与时间的关系

Fig. 4 Relationships Between Swelling-shrinkage Rate and Time Under Different Loads

Rate and Time Under Different Loads

缩率越大,说明增大上覆荷载可以增大红黏土的收缩性能。

(3)任何上覆荷载作用下,所有试样第1次干湿循环下红黏土胀缩性能最为显著,最大膨胀率达6.8%,随着干湿循环次数的增加,胀缩率曲线越来越平缓或有部分降低趋势,胀缩性能趋于稳定状态。

### 3.1.2 不同压实度下试样胀缩率与时间关系

图5为不同压实度下试样胀缩率与时间的关系。由图5可知:上覆荷载为0 kPa和50 kPa时试样膨胀,同一荷载下,压实度越大,膨胀量越大。上覆荷载为100 kPa和200 kPa时,试样收缩,同一荷载下,压实度越小,试样收缩量越大。

### 3.1.3 不同初始含水率下试样胀缩率与时间关系

在相同荷载情况下,不同初始含水率试样胀缩率随时间的变化规律如图6所示。由图6可知:上覆荷载为0 kPa和50 kPa时,试样膨胀,同一荷载下,初始含水率 $w$ 越小,膨胀量越大。上覆荷载为

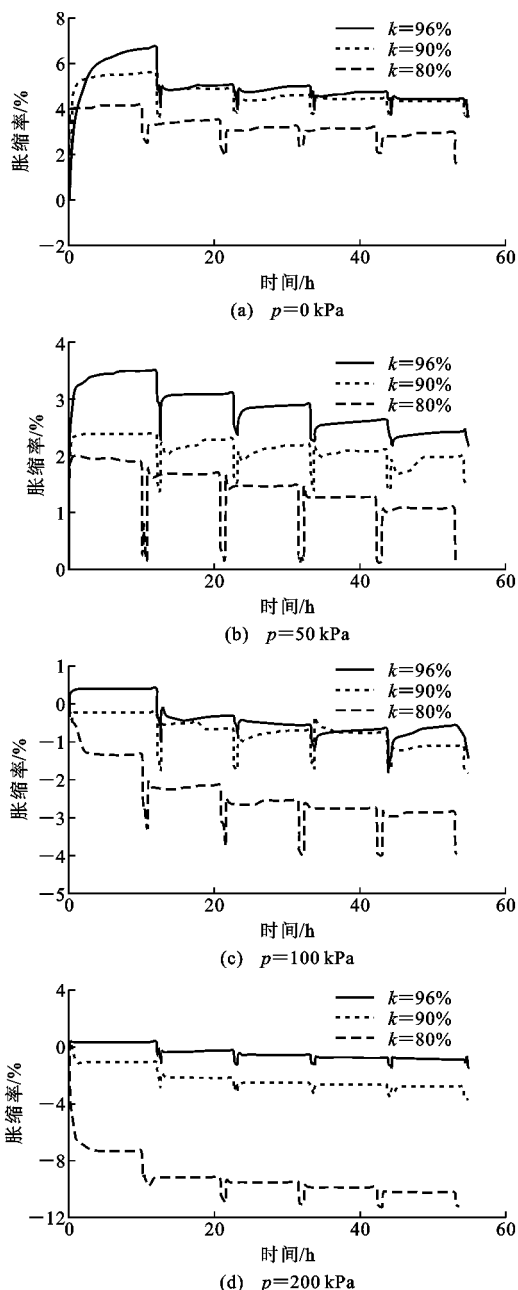


图5 不同压实度下试样胀缩率与时间的关系

Fig. 5 Relationships Between Swelling-shrinkage Rate and Time Under Different Compaction Degrees

100 kPa和200 kPa时,试样收缩,同一荷载下,初始含水率越大,试样收缩量越大。随上覆荷载的增大,不同初始含水率试样胀缩率差值逐渐缩小,表明初始含水率对试样胀缩率的影响随上覆荷载的增大而减弱。

### 3.2 绝对胀缩率与循环次数的关系

图7~9分别给出了不同上覆荷载、不同压实度和不同初始含水率3种条件下试样绝对胀缩率与循环次数的变化规律。由图7~9可知:

(1)无论上覆荷载多大,所有第1次干湿循环对

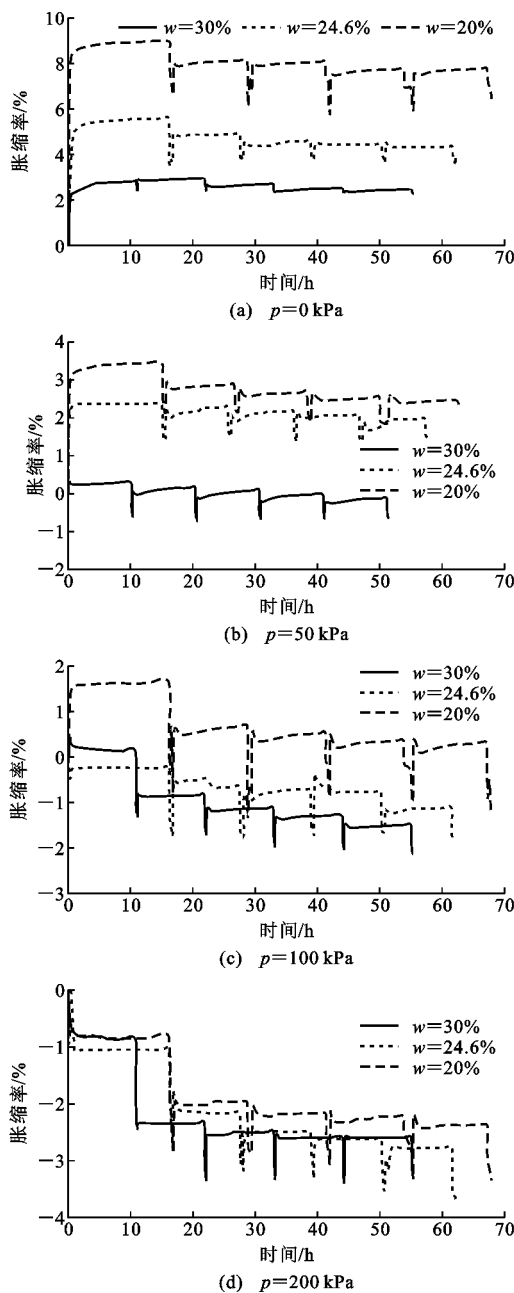


图 6 不同初始含水率下试样胀缩率与时间的关系  
( $k=90\%$ )

Fig. 6 Relationships Between Swelling-shrinkage Rate and Time Under Different Initial Moisture Contents ( $k=90\%$ )

试样高度的影响均为最大,之后试样高度基本保持不变。

(2)上覆荷载为 0 kPa 和 50 kPa 时,绝对胀缩率大于 0,试样膨胀,且随压实度的增大而增大,随含水率的增大而减小;上覆荷载为 100 kPa 和 200 kPa 时,绝对胀缩率小于 0,试样收缩,且绝对胀缩率的绝对值随压实度的增大而减小,随初始含水率的增大而增大,这与前文分析的结果一致。

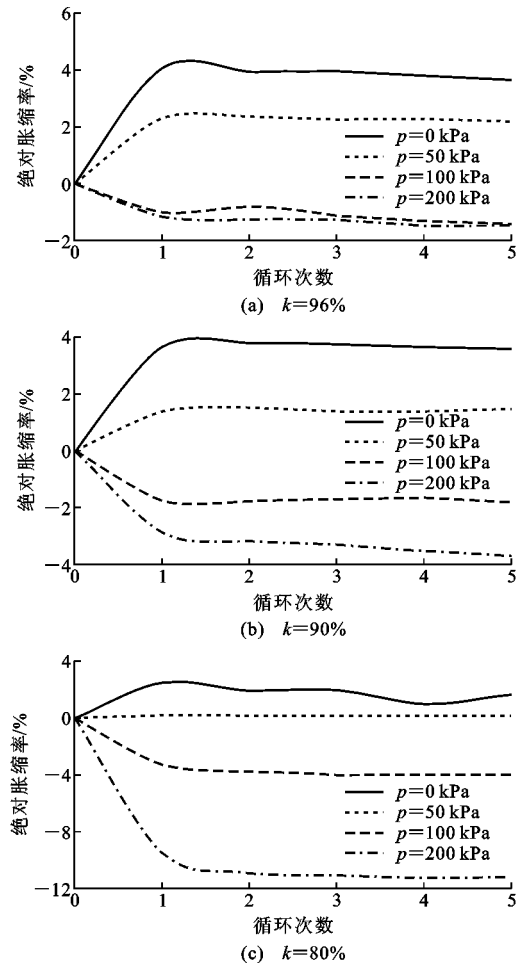


图 7 不同荷载下绝对胀缩率与循环次数的关系

Fig. 7 Relationships Between Absolute Swelling-shrinkage Rate and Cycle Under Different Loads

3.3 相对胀缩率与循环次数的关系

图 10~12 分别给出了不同上覆荷载、不同压实度和不同初始含水率 3 种条件下试样相对胀缩率与循环次数的变化规律。由图 10~12 可知:

(1)无论上覆荷载多大,第 1 次干湿循环相对胀缩率最大,之后其曲线趋于平缓,说明试样第 1 次干湿循环下红黏土胀缩性能最为显著。

(2)随着上覆荷载增大,不同初始含水率试样相对胀缩率逐渐接近,说明初始含水率对试样胀缩率的影响随荷载的增大而减弱。

4 原因分析

红黏土是一种由多种矿物组成的特殊性土,以高岭石、伊利石或绿泥石为主,此外还含有蒙脱石、蛙石、游离氧化铁,以及少量针铁矿等物质成分<sup>[11-12]</sup>。红黏土吸水会发生膨胀变形,如果这种膨胀变形受到限制必然产生膨胀力。土体吸水膨胀或产生膨胀力的原因较为复杂,有学者研究得知红黏

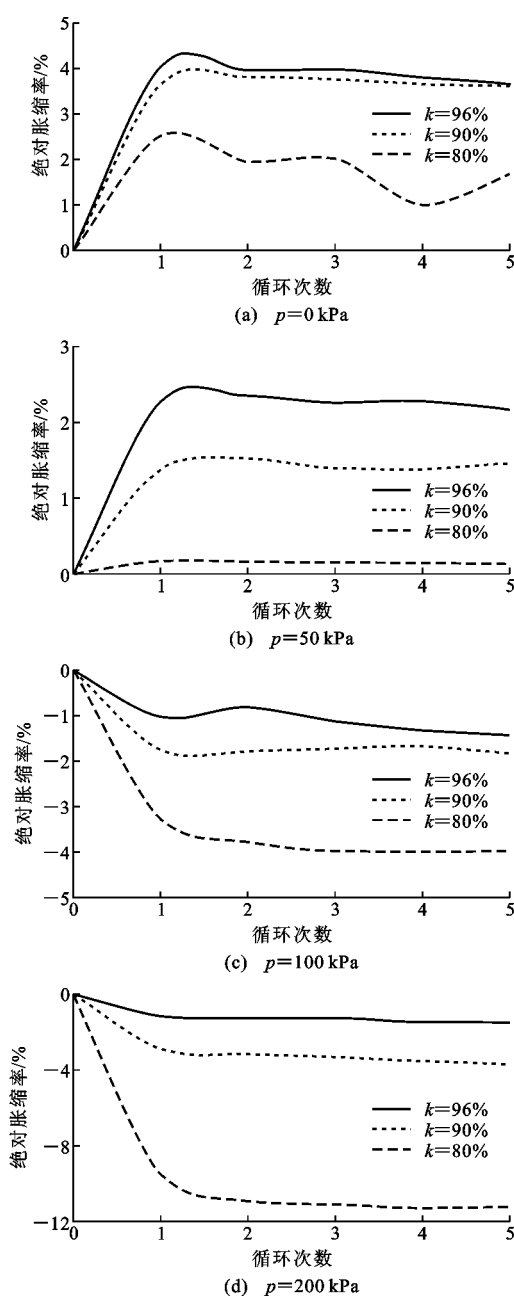


图 8 不同压实度下绝对胀缩率与循环次数的关系  
Fig. 8 Relationships Between Absolute Swelling-shrinkage Rate and Cycle Under Different Compaction Degrees

土土产生胀缩变形的实质是红黏土内部黏土矿物组分与水之间发生一系列的物理化学反应以及力学效应共同作用而引起的,是内外因素共同作用的结果,其中内因是膨胀土所具有的特殊性质,外因是外界诱发因素,主要是水分。红黏土中蒙脱石等强亲水性物质与结构特征对其膨胀起了关键性作用,水是引起红黏土产生膨胀变形或膨胀力的主要外因。当水进入土体孔隙后,在水的作用下,红黏土中的亲水矿物与极性水分子相互结合,形成了结合水膜,分布在黏土矿物颗粒表面、黏土颗粒之间及其集聚体周

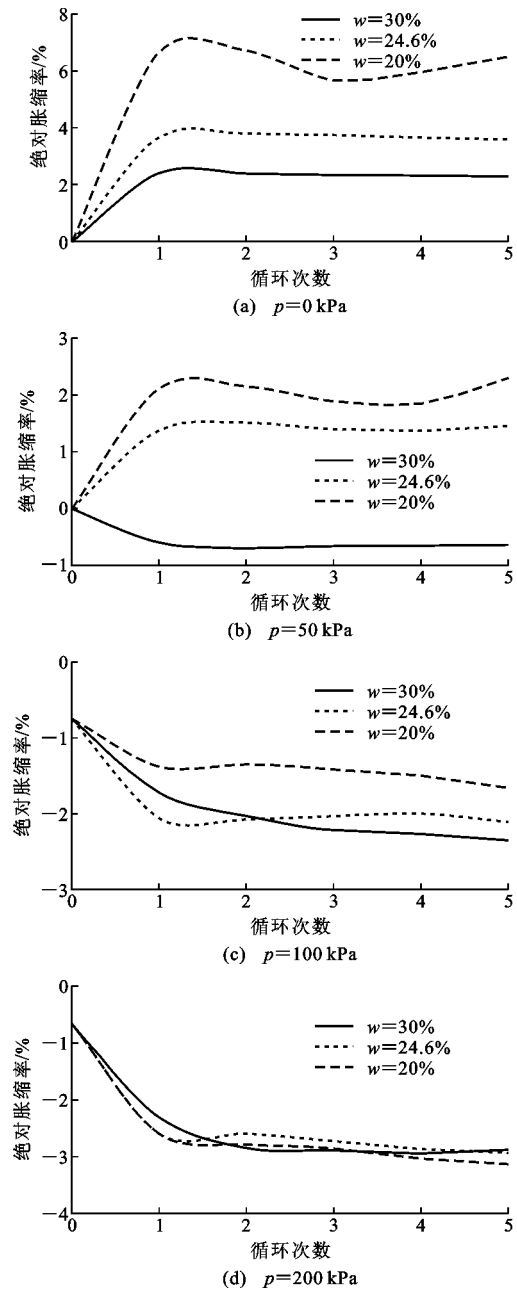


图 9 不同初始含水率下绝对胀缩率与循环次数的关系  
Fig. 9 Relationships Between Absolute Swelling-shrinkage Rate and Cycle Under Different Initial Moisture Contents

围,结合水膜的厚度增大导致土体晶架结构受力发生改变,引起结合水膜与黏土矿物颗粒的连接性发生破坏,进而使红黏土表现出膨胀特性,而在有侧限荷载作用下时,红黏土的膨胀特性因受到抑制而形成膨胀力<sup>[13-21]</sup>。在本次试验过程中,土体均在有侧限条件下进行上覆荷载的施加,试样只能在竖直方向膨胀收缩,当上覆荷载为 50 kPa 时,其值小于红黏土吸水产生的膨胀力,试样仍会表现出膨胀特性,只是膨胀变形量有所减小,而当上覆荷载大于等于 100 kPa 时,其值高于红黏土由于吸水产生的膨胀

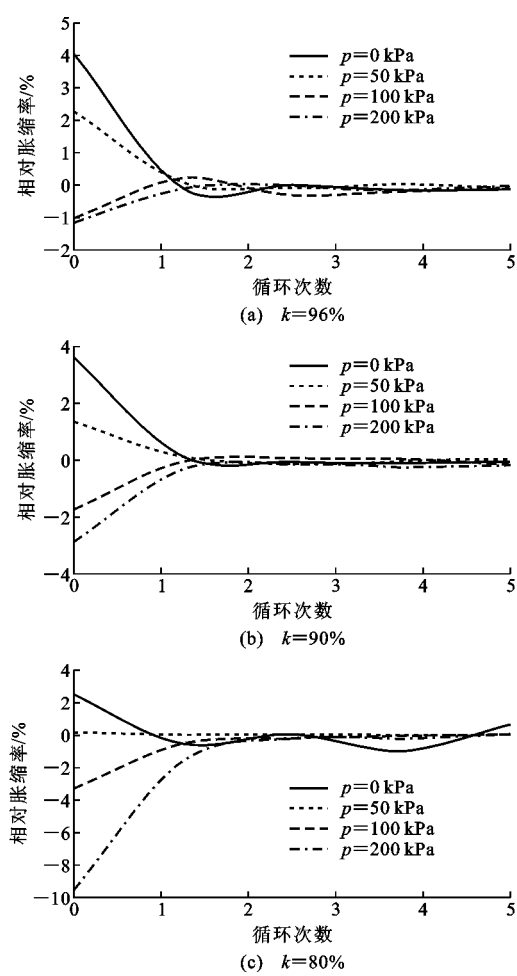


图 10 不同荷载下相对胀缩率与循环次数的关系  
Fig. 10 Relationships Between Relative Swelling-shrinkage Rate and Cycle Under Different Loads

力,那么试样不仅不表现出膨胀特性反而收缩,且收缩量随荷载的增大而增大,这也表明红黏土因吸水而产生的膨胀力大致在 50~100 kPa 之间。

5 结 语

(1)提出了一种模拟土体荷载作用下干湿循环试验的方法,该循环过程中不拆卸试样以避免对试样的扰动,克服了以前荷载为 0 的土体干湿循环试验的缺陷,可以应用于红黏土地区的工程建设,为工程设计提供更加合理的技术指标。

(2)上覆荷载为 0 kPa 和 50 kPa 时,压实度越大,膨胀量越大。初始含水率越小,膨胀量越大。上覆荷载为 100 kPa 和 200 kPa 时,压实度越小,试样收缩量越大。初始含水率越大,试样收缩量越大。

(3)上覆荷载为 0 kPa 和 50 kPa 时,干湿循环下红黏土胀缩率大于 0,试样膨胀。压力越大,胀缩率越小,说明增大上覆荷载可以抑制红黏土的膨胀

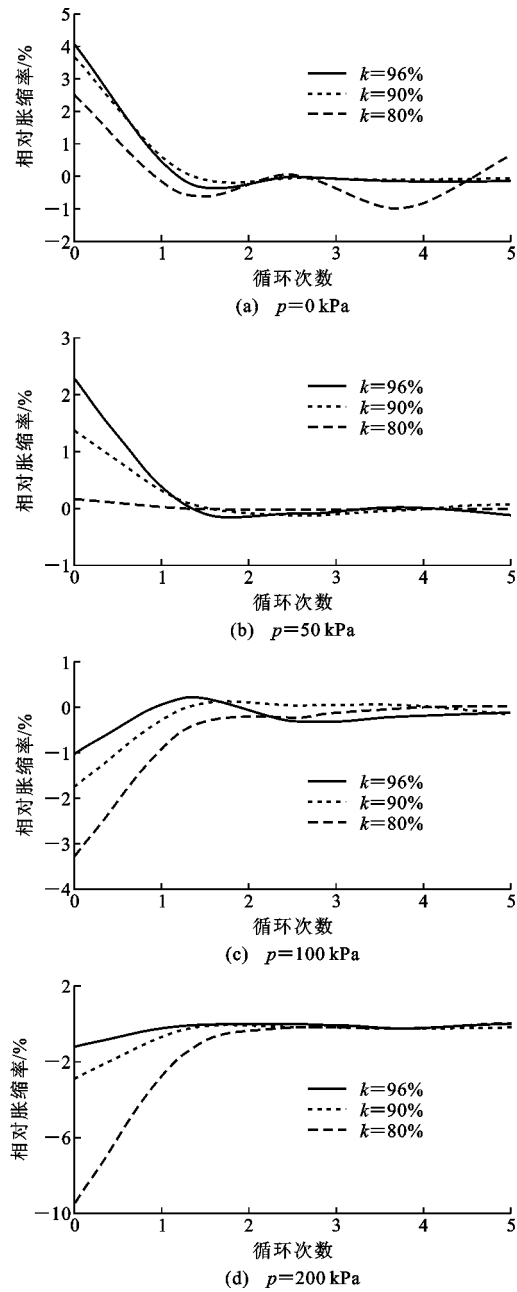


图 11 不同压实度下相对胀缩率与循环次数的关系  
Fig. 11 Relationships Between Relative Swelling-shrinkage Rate and Cycle Under Different Compaction Degrees

性能。上覆荷载为 100 kPa 和 200 kPa 时,干湿循环下红黏土胀缩率小于 0,试样收缩。压力越大,胀缩率越大,说明增大上覆荷载可以增大红黏土的收缩性能。

(4)任何上覆荷载作用下,所有试样第 1 次干湿循环时红黏土胀缩性能均最为显著,随着干湿循环次数的增加,胀缩率曲线越来越平缓,胀缩性能趋于稳定状态。

(5)随上覆荷载的增大,不同初始含水率试样的胀缩率、绝对胀缩率、相对胀缩率差别逐渐减小,初

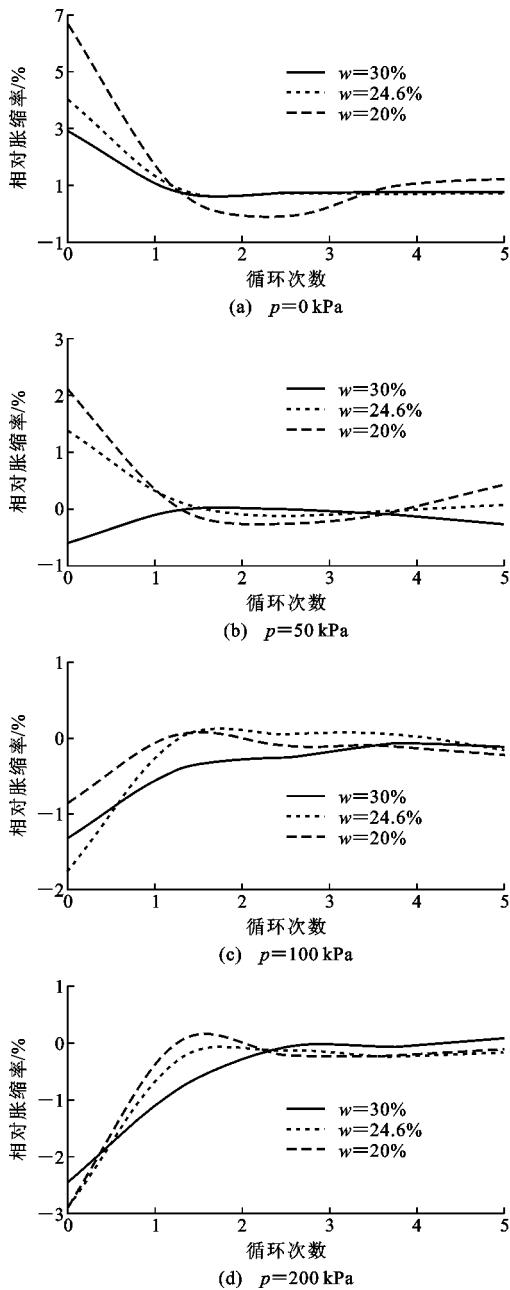


图 12 不同初始含水率下相对胀缩率与循环次数的关系

Fig. 12 Relationships Between Relative Swelling-shrinkage Rate and Cycle Under Different Initial Moisture Contents

始含水率对试样胀缩性影响随上覆荷载的增大逐渐减弱。

(6)试验烘干过程采用酒精加热,虽对试验装置进行了改进,但仍无法避免酒精火焰的不稳定,可能导致烘干温度无法绝对稳定,致使试验结果有一定误差。未来研发更加稳定的加热装置可以有效避免这一缺陷,比如采用电阻丝加热装置。

# 参考文献:

## References:

[1] 张永婷,王保田,朱宝平.击实红黏土与膨胀土的变形

特性对比研究[J].科学技术与工程,2013,13(6):1676-1680,1712.

ZHANG Yong-ting, WANG Bao-tian, ZHU Bao-ping. Comparative Study on Compacting Red Clay and Expansive Soil Deformation Characteristics [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(6): 1676-1680, 1712.

[2] 王莹莹,张文慧,朱德志.初始含水率对红黏土胀缩变形特性的影响试验研究[J].科学技术与工程,2014,14(6):242-246.

WANG Ying-ying, ZHANG Wen-hui, ZHU De-zhi. Experimental Research on the Affect of the Swell-shrinking Deformation of Red Clay Under the Condition of Different Initial Moisture Content [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(6): 242-246.

[3] 龚琰.干湿循环作用下红黏土的变形和强度特性研究[D].湘潭:湖南科技大学,2015.

GONG Yan. Study on Deformation and Strength Properties of Red Clay Under Drying and Wetting Circulation [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2015.

[4] 赵雄飞,陈开圣.干湿循环条件下红粘土的胀缩变形特性研究[J].贵州大学学报:自然科学版,2016,33(1):132-135.

ZHAO Xiong-fei, CHEN Kai-sheng. Study on the Swell & Shrinking Deformation Characteristics of Red Clay Under the Condition of Dry-wet Circulation [J]. Journal of Guizhou University: Natural Sciences, 2016, 33(1): 132-135.

[5] 陈开圣.干湿循环作用下红黏土抗剪强度特性研究[J].公路,2016(2):45-49.

CHEN Kai-sheng. Study of Shear Strength Characteristics for Red Clay Under Wet and Dry Cycles [J]. Highway, 2016(2): 45-49.

[6] 黄丁俊,张添锋,孙德安,等.干湿循环下压实红黏土胀缩特性试验研究[J].水文地质工程地质,2015,42(1):79-86.

HUANG Ding-jun, ZHANG Tian-feng, SUN De-an, et al. Experimental Study of Swell-shrinking Behaviour of Compacted Laterite After Wetting-drying Cycles [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 79-86.

[7] 陈开圣,胡鑫.高液限红粘土变形特性研究[J].公路交通科技,2010,27(3):49-53,58.

CHEN Kai-sheng, HU Xin. Study of Deformation Characteristic for High Liquid Limit Red Clay [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(3): 49-53, 58.



- [8] 王磊. 非饱和高液限红粘土强度特性及本构模型研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014.  
WANG Lei. A Study on the Strength Characteristics and the Constitutive Model of Unsaturated and High Liquid Limit Red Clay[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2014.
- [9] 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.
- [10] 张文慧. 膨胀土胀缩特性试验与边坡稳定性研究[D]. 南京: 河海大学, 2014.  
ZHANG Wen-hui. Study on Swelling-shrinkage Characteristics and Slope Stability of Expansive Soil[D]. Nanjing: Hohai University, 2014.
- [11] 屈儒敏. 红粘土与膨胀土[J]. 工程勘察, 1979(5): 58-62.  
QU Ru-min. Red Clay and Expansive Soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1979(5): 58-62.
- [12] 屈儒敏, 梅世龙. 红土与红粘土[J]. 水文地质工程地质, 1987, 6(3): 13-17, 34.  
QU Ru-min, MEI Shi-long. Red Soil and Red Clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1987, 6(3): 13-17, 34.
- [13] 杨俊, 许威, 张国栋, 等. 上覆荷载对改良膨胀土膨胀性影响研究[J]. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2013, 28(5): 713-718.  
YANG Jun, XU Wei, ZHANG Guo-dong, et al. Research on Overlying Load Impact on the Expansion Characteristic of Improved Expansive Soil[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2013, 28(5): 713-718.
- [14] 谢云, 陈正汉, 孙树国, 等. 重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1636-1642.  
XIE Yun, CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, et al. Test Research on Three-dimensional Swelling Pressure of Remolded Expansive Clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1636-1642.
- [15] 周峰, 肖琪聃, 吴珊. 上覆荷载作用下胀缩性土干湿循环过程中胀缩变形规律研究[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2017, 30(3): 474-477.  
ZHOU Feng, XIAO Qi-dan, WU Shan. Wet and Dry Cycles in Soil Swelling and Shrinkage Deformation Regularity of Expansion and Contraction Under the Overlying Load[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2017, 30(3): 474-477.
- [16] 廖义玲, 余培厚. 红粘土的微结构及其概化模型[J]. 工程地质学报, 1994, 2(1): 27-37.  
LIAO Yi-ling, YU Pei-hou. The Microstructure and Generalized Model of Red Clay[J]. Journal of Engineering Geology, 1994, 2(1): 27-37.
- [17] 文松松. 广西宁明膨胀土的膨胀力试验研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2017.  
WEN Song-song. Experimental Study on the Expansive Force in the Expansive soil in Ningming County of Guangxi[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2017.
- [18] 屈儒敏. 红粘土的矿物成分[J]. 工程勘察, 1981(6): 63-65.  
QU Ru-min. Mineral Composition of Red Clay[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1981(6): 63-65.
- [19] 廖义玲, 毕庆涛, 姜国萍, 等. 碳酸盐岩地表岩溶与红粘土[J]. 地球与环境, 2005, 33(4): 13-19.  
LIAO Yi-ling, BI Qing-tao, JIANG Guo-ping, et al. Karst and Red Clay on the Surface of Carbonate Terrane[J]. Earth and Environment, 2005, 33(4): 13-19.
- [20] 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.  
LIU Te-hong. The Problem of Expansive Soil in Construction Practice[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.
- [21] 肖荣久. 陕南膨胀土及其灾害地质研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.  
XIAO Rong-jiu. Studies on Expansive Soils and Its Hazard Geology of the South of Shaanxi[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 1995.