

# 非饱和网纹红土比例加载特性研究

徐有娜<sup>1</sup>, 李建中<sup>2</sup>

(1. 建设综合勘察研究设计院有限公司, 北京 100007; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 通过利用应力控制式全自动 GDS 静三轴仪对含水率相同、干密度相同的重塑网纹红土进行不同基质吸力条件下的恒应力比的三轴固结排水试验, 研究了非饱和网纹红土比例加载特性。研究表明: (1) 在不同恒应力比的分级加载条件下, 非饱和网纹红土的基质吸力平衡过程中, 反压排水量有一个明显的转折点, 此转折点可作为判断基质吸力是否到达平衡的标志; (2) 通过对比不同基质吸力下的轴向应变和时间的关系曲线发现, 基质吸力的增加引起轴向应变增加; (3) 在偏应力保持不变的条件下, 基质吸力的增加没有引起轴向应变的显著增加; (4) 不同基质吸力条件下的偏应力和净平均应力之间呈直线关系, 其斜率近似为恒应力比; (5) 提出了一种可以预测非饱和网纹红土比例加载条件下的径向应变的方法。

**关键词:** 非饱和土; 网纹红土; 恒应力比; 应变; 加载特性

**中图分类号:** P642.1; TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)02-0117-08

## Research on behavior of unsaturated reticulate red clay under proportional loading

XU Youna<sup>1</sup>, LI Jianzhong<sup>2</sup>

(1. China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying Ltd., Beijing 100007, China;

2. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

**Abstract:** With the stress-controlled automatic GDS static triaxial gauge, the behavior of unsaturated reticulated red clay under proportional loading was studied through triaxial consolidation and drainage test at constant stress ratio for the remolded reticulate red clay with the same moisture content and dry density at different matric suctions. The experimental results show that: (1) The back pressure displacement of unsaturated reticulate red clay has an obvious turning point in the process of matric suction equilibrium at different constant stress ratios, which can be used as a marker to judge whether matric suction reaches equilibrium or not; (2) By comparing the relation curves of axial strain and time at different matric suctions, it was found that the increase of stromal suction caused the increase of axial strain; (3) Under the condition that the deviator stress remains unchanged, the increase of matric suction does not cause a significant increase of axial strain; (4) There is a linear relationship between the deviator stress and the net mean stress at different matric suctions, and its slope is approximate to the constant stress ratio; (5) A method is proposed to predict the radial strain of unsaturated reticulate red clay under proportional loading.

**Key words:** unsaturated soil; reticulate red clay; constant stress ratio; strain; loading behavior

在建造房屋和挡土建筑物的实际工程中, 地基土常常位于地下水位以上, 并且地基土的加载路径一般都属于比例加载路径<sup>[1-2]</sup>, 并且处于恒应力比路

径下的土体大多处于非饱和状态, 由于非饱和土体的恒应力比路径的复杂性, 国内外有不少学者针对各类土的比例加载特性开展了一系列研究, 如 Cris-

收稿日期: 2020-07-19; 修回日期: 2020-11-07 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.02.017

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“非饱和网纹红土的蠕变与加载速率效应研究”(编号: 41572269)

作者简介: 徐有娜, 女, 汉族, 1989年生, 技术骨干, 工程师, 地质资源与地质工程专业, 硕士, 从事工程地质与岩土工程方面的研究工作, 北京市东直门内大街177号, xuyun1@cigis.com.cn。

引用格式: 徐有娜, 李建中. 非饱和网纹红土比例加载特性研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 117-124.

XU Youna, LI Jianzhong. Research on behavior of unsaturated reticulate red clay under proportional loading[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 117-124.

pel J J<sup>[3]</sup>对不同土样进行了三轴恒应力比例试验,研究表明土的侧向变形在不同的等比压力下的比例关系;孙岳崧等<sup>[4]</sup>对砂土进行了不同应力路径下的试验,恒应力比试验中其应力-应变关系曲线呈幂函数型,随 $k$ 值(恒应力比)的增大 $\sigma_1$ (轴向应力)- $\varepsilon_a$ (轴向应变)曲线逐渐变陡;钱建固<sup>[5]</sup>从土体塑性各向异性的微宏观机理上分析,得到在比例加载条件下土体表现为等向硬化和共轴塑性;张宁宁等<sup>[6]</sup>研究了重塑黄土强度在恒应力比路径下,恒应力比与不同初始固结围压及不同初始含水率的关系。以上研究表明:土体非饱和程度影响土体恒应力比路径应变特征,相关的研究目前还处于基础阶段。因此,本文主要研究的是土在不同饱和程度下的比例加载应力路径的应变特性。

网纹红土是洞庭湖地区常见的土体<sup>[7-8]</sup>,并且它是一种结构性较强的土,颗粒基本结构单元形状多为片状颗粒和片状集合体,其颗粒之间主要为面-面和面-边接触<sup>[9]</sup>,具有压缩性较低、孔隙比小、抗剪强度较高的特性,是良好的持力层<sup>[10-11]</sup>。已有很多学者对网纹红土进行流变特性研究<sup>[12-13]</sup>,但是对于网纹红土在应力比例加载路径下的特性研究现在都还未涉及。

本文利用应力控制式全自动GDS静三轴仪对几组含水率相同、干密度相同的水网纹红土进行不同基质吸力条件下的恒应力比的三轴固结排水试验,探讨非饱和土网纹红土基质吸力平衡的时间规律,不同恒应力比加载路径下的偏应力和净平均应力、轴向应变和时间、轴向应变与径向应变等关系。

## 1 试验方案及过程

### 1.1 试验土样

试验土样为取自湖南省岳麓山脚下的网纹红土,取土深度约3 m,土粒密度为 $2.71 \text{ g/cm}^3$ ,天然含水率为 $23.83\% \sim 26.88\%$ ,天然密度为 $1.90 \sim 1.95 \text{ g/cm}^3$ ,天然干密度为 $1.59 \sim 1.75 \text{ g/cm}^3$ 。试样的制作按照《土工试验方法标准》(GBT 50123-1999)制备三轴试样的要求制样,并采用真空抽气饱和法对试样进行饱和。试样目标尺寸为 $61.8 \text{ mm} \times 124 \text{ mm}$ ,参考网纹红土的天然土样的物理力学性质,试验采用的土样的土粒密度为 $2.71 \text{ g/cm}^3$ ,含水率为 $22\%$ ,土样密度为 $2.0 \text{ g/cm}^3$ ,初始干密度为 $1.63 \text{ g/cm}^3$ 。

试验过程中,土样的孔隙水压始终为0。

### 1.2 恒应力比试验

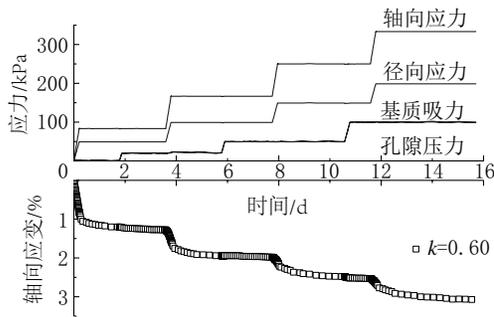
本次试验采用应力控制式全自动GDS静三轴仪4D应力路径进行试验。应力控制指径向应力与轴向应力均按一定速率增大,根据工程实际可能出现的情况,每次施加的径向应力与轴向应力的比值即恒应力比 $k$ 值分别为0.60、0.63、0.65、0.68、0.70。

### 1.3 加压标准

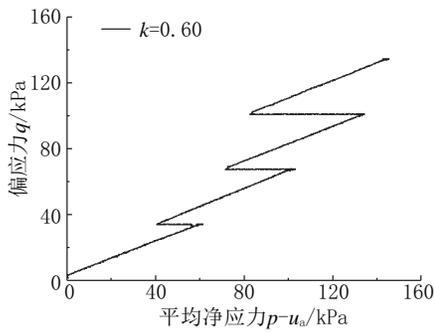
将饱和土体施加一级径向应力和轴向应力,待加压时间到目标值后,保持径向应力和轴向应力不变进行固结,待固结稳定后,加一定的基质吸力(20、30、50、60、100、120 kPa),待基质吸力平衡后,加下一级径向应力和轴向应力。该试验采用匀速加载固结方式,加载速率为 $10 \text{ kPa/h}$ 。试验过程中,固结围压 $\sigma_3$ 取50、100、150、200 kPa。试验方案见表1。固结稳定标准采用反压体积变化基本保持不变,即取24 h内排水量 $< 0.1 \text{ cm}^3$ 的时刻作为固结稳定的标准。在试验过程中尽量保持室内温度不变( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )。典型试验结果如图1所示。

表1 试验方案  
Table 1 Test plan

$k$ 值	$\eta$	$u_a - u_w / \text{kPa}$
0.60	0.5454	0
		20
		50
		100
0.63	0.4911	0
		30
		60
		120
0.65	0.4545	0
		20
		50
		100
0.68	0.4068	0
		30
		60
		120
0.70	0.3750	0
		20
		50
		100



(a)应力应变与时间的曲线



(b)应力路径图

图 1 典型试验结果

Fig.1 Typical test results

## 2 试验结果分析

### 2.1 基质吸力平衡特点

此次试验的基质吸力平衡的标准都采用反压体积变化基本保持不变,即取 24 h 内反压排水量小于试样体积的 0.05% 作为基质吸力达到稳定状态的标准<sup>[14-15]</sup>。不同试样的不同恒应力比的分级加载试验中各个试样的反压的排水量及对应的基质吸力如图 2 所示(仅列出  $k=0.60$  的情况)。

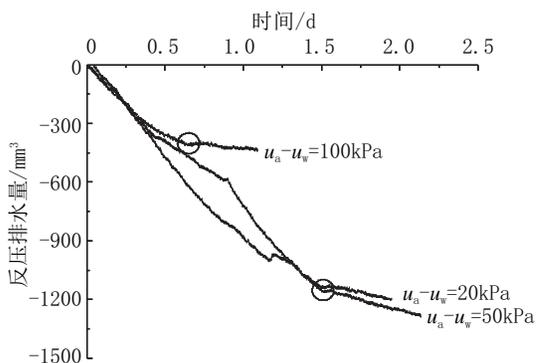


图 2  $k=0.60$  时不同基质吸力的反压排水量与时间的关系

Fig.2 Back pressure displacement volume vs time at  $k=0.60$  of matrix suction

从图 2 可以看出,随着时间的增加,反压排水量近似成直线增加,但是邻近基质吸力平衡时有一个转折点(如图中的黑色圈部分),可以预示着基质吸力平衡。利用此方法判断基质吸力的平衡时间可以大大缩短。图 3 是利用此方法判断出每个基质吸力平衡的时间及对应的基质吸力的散点图,从图中可以看出每个基质吸力的平衡时间不同,但是基本为 1.5 d 左右。

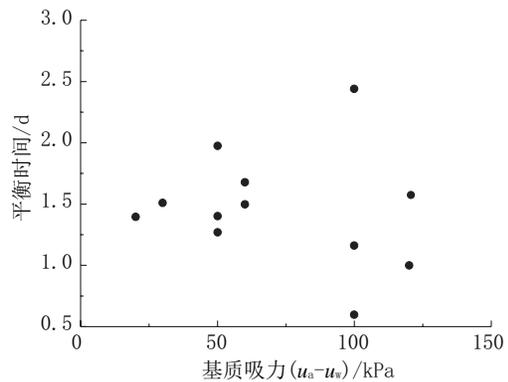


图 3 基质吸力和平衡时间的关系

Fig.3 Matric suction vs equilibrium time

### 2.2 基质吸力对不同加载阶段的影响

以前一些学者<sup>[16-25]</sup>进行了分级加载试验,转换过的每级加载的固结曲线如图 4 所示。在本次试验中,将每级不同基质吸力下的轴向应变转换成起始点,前一段为比例加载和固结过程,后一段为加基质吸力和基质吸力平衡过程(见图 5)。

从图 5(a)、(c)、(e)中可以看出在基质吸力为 50、100 kPa 条件下的加载固结的轴向应变非常接近(与图 b、d 相比)。出现本次试验的情况笔者认为应该是受基质吸力的影响。从作用机理上分析,由于加了基质吸力,土体中有了空气,由于空气的可压缩性,此后的固结不仅是随着水的消散的土体的固结,还包括气体的压缩,所以致使以后的固结变形加大。这个结论在实际工程中体现为当地下水水位下降后土体在荷载的作用下变形增加,甚至达到临界状态造成地表坍塌。

### 2.3 偏应力与净平均应力的关系

图 6 是不同  $k$  值下的  $q-(p-u_a)$  的曲线关系。为了更清楚地反映其中的关系,只选取了  $k=0.60$  和  $k=0.68$  两个  $k$  值的曲线。

结合图 1(b)和图 6 可以看出,不同基质吸力下

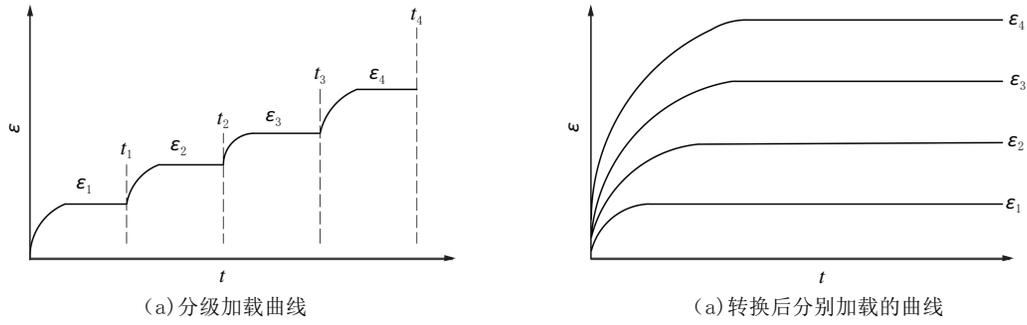


图4 分级加载与转换后分别加载曲线

Fig.4 Step-load curves and staged-load curves converted from step-load curves

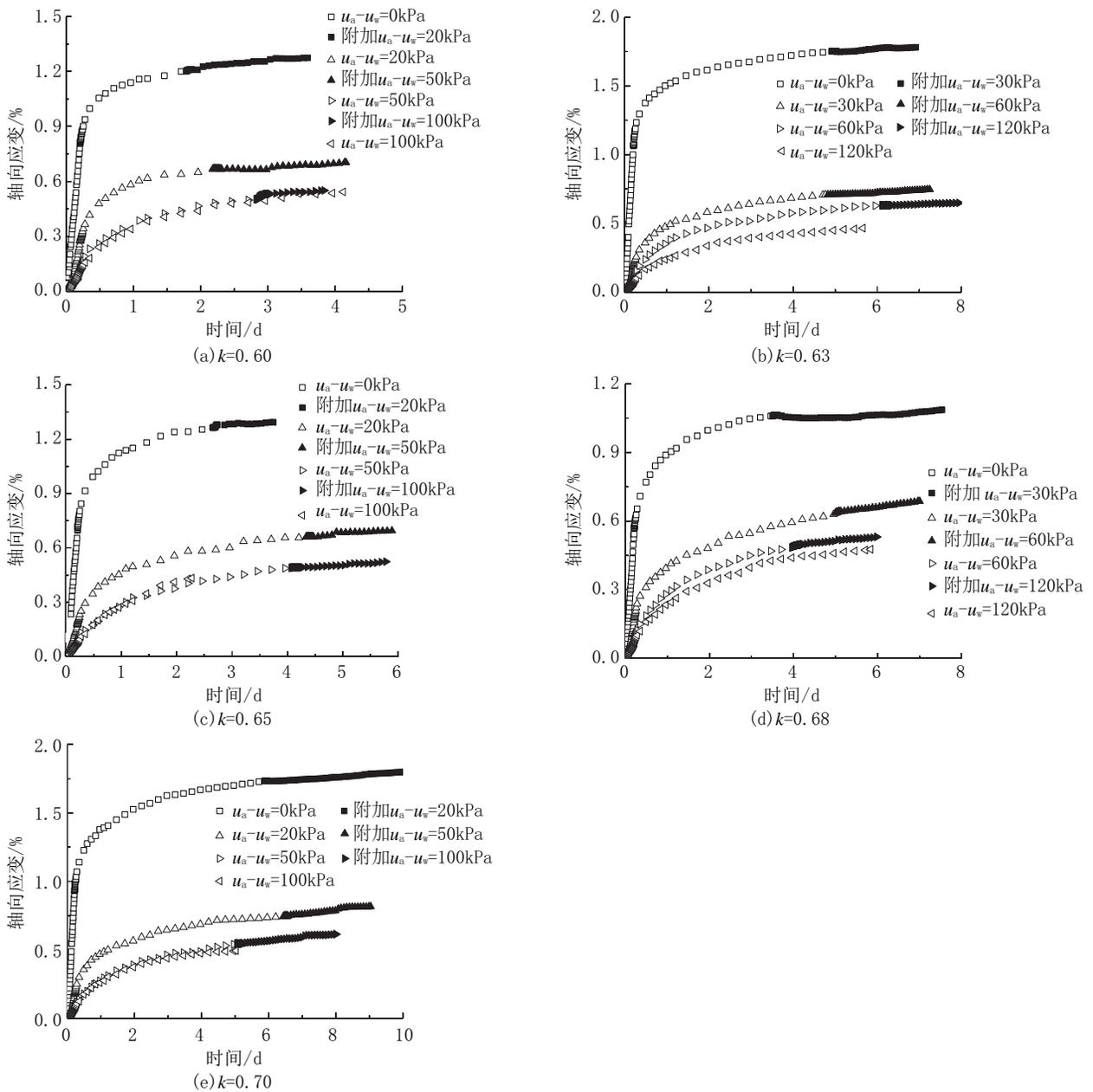


图5 不同基质吸力下的轴向应变与时间的关系

Fig.5 Axial strain vs time at different matrix suction

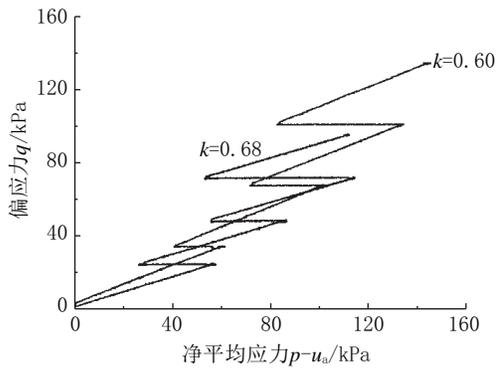


图 6 不同  $k$  值的偏应力和净平均应力的关系  
Fig.6 Deviatoric stress vs net mean stress at different  $k$  values

偏应力-净平均应力  $q-(p-u_a)$  呈直线关系。现将其拟合,所有拟合值见表 2。

通过拟合可以发现,不同基质吸力下  $q-(p-u_a)$  成直线,相关系数  $R^2$  都在 0.99 以上,其斜率近似为  $\eta$  恒应力比值,并且有很小的上下波动,直线形式如下式:

$$q = \eta(p - u_a) + b_1 \quad (1)$$

将截距  $b_1$  和基质吸力  $(u_a-u_w)$  拟合后发现截距和基质吸力成直线关系,如下式:

$$b_1 = m_1(u_a - u_w) + n \quad (2)$$

相关系数  $R^2$  都在 0.97 以上,拟合图见图 7,拟合数据见表 3。

结合公式(1)、(2),可以得出理论上  $n$  应该为 0,并且拟合出截距  $n$  的值为 0~2,因此,忽略不计,进

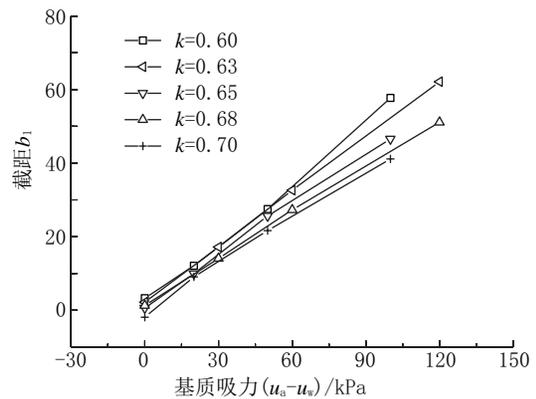


图 7 不同  $k$  值的基质吸力与截距的关系  
Fig.7 Matrix suction vs intercept at different  $k$  values

表 2 所有拟合值和相关系数

Table 2 Fitting values and correlation coefficients

$k$ 值	$\eta$	$u_a-u_w/\text{kPa}$	关系曲线	斜率	截距 $b_1$	相关系数 $R^2$
0.60	0.5454	0	$q = a(p - u_a) + b_1$	0.52064	3.28538	0.99945
		20		0.54996	12.10553	0.99961
		50		0.55487	27.48352	0.99866
		100		0.53344	57.72315	0.99960
0.63	0.4911	0		0.48356	2.16730	0.99936
		30		0.47741	17.13662	0.99947
		120		0.47389	62.13842	0.99969
0.65	0.4545	0		0.47220	0.59376	0.99896
		20		0.46893	9.95272	0.99939
		50		0.44150	25.60637	0.99971
		100		0.46891	46.59509	0.99932
0.68	0.4068	0		0.41201	1.29544	0.99913
		30		0.39994	14.07496	0.99902
		120		0.39656	51.12083	0.99923
0.70	0.3750	0		0.42411	-1.92173	0.99913
		20		0.37196	9.06543	0.99894
		100	0.35925	41.15270	0.99920	

表3 截距和基质吸力拟合值

Table 3 Fitting values between intercept and matrix suction

$k$ 值	斜率 $m_1$	截距 $n$	相关系数 $R^2$
0.60	0.5486	1.8346	0.996
0.63	0.5003	2.2473	0.999
0.65	0.4620	1.0502	0.978
0.68	0.4153	1.0384	0.995
0.70	0.4240	0.5357	0.996

而截距  $b_1$ 和基质吸力( $u_a-u_w$ )的关系简化为:

$$b_1 = m_1(u_a - u_w) \quad (3)$$

将斜率  $m_1$ 与  $k$ 值拟合呈直线关系,如下式:

$$m_1 = ak + c \quad (4)$$

其相关系数为  $R^2=0.9328$ ,  $a=-1.3499$ ,  $c=1.3502$ (参见图8)。

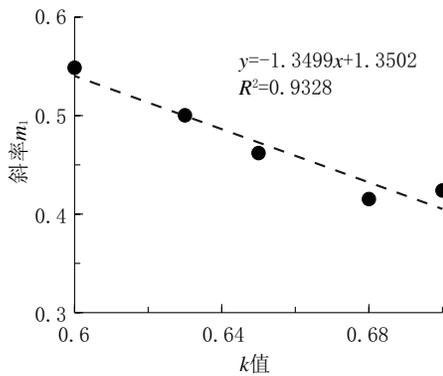


图8 不同  $k$ 值的基质吸力与斜率的关系

Fig.8 Matrix suction vs slope at different  $k$  values

结合公式(2)、(3)、(4)可得出偏应力与净平均应力、基质吸力、 $k$ 值的关系:

$$q = \eta(p - u_a) + (ak + c)(u_a - u_w) \quad (5)$$

综上所述,不同  $k$ 值、不同基质吸力下的等比例加载条件下的偏应力-平均有效应力  $q-(p-u_a)$ 成直线关系,关系式为式(1)。而偏应力与净平均应力、基质吸力、 $k$ 值关系如式(5)。

#### 2.4 轴向应变与径向应变之间的关系

不同  $k$ 值、不同基质吸力下固结阶段的轴向应变与径向应变的关系如图9所示(选2个典型曲线)。

从图9中可以看出,轴向应变与径向应变近似成直线关系。现将其拟合呈线性,如式(6),所有拟合值见表4:

$$\epsilon_r = m_2 \epsilon_a + b_2 \quad (6)$$

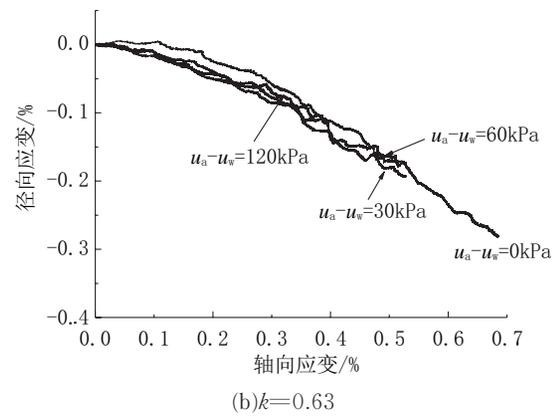
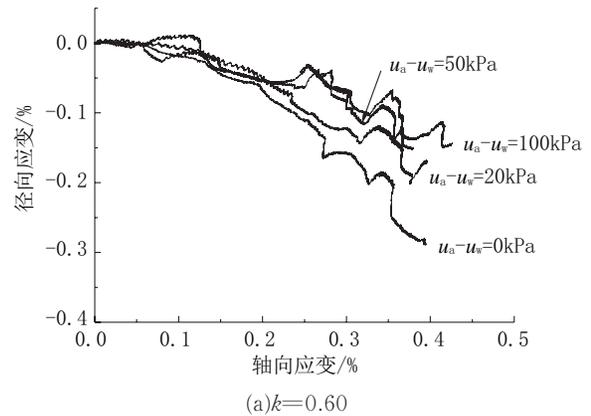


图9 不同  $k$ 值的轴向应变与径向应变的关系

Fig.9 Axial strain vs radial strain at different  $k$  values

如果忽略掉网纹红土的瞬时变形(即土的变形都是由固结与蠕变产生),则式(6)中的  $b_2=0$ ,则式(6)可以转变成:

$$\epsilon_r = m_2 \epsilon_a \quad (7)$$

现将基质吸力和斜率  $m_2$ 拟合,结果发现呈抛物线形式,如式(8):

$$m_2 = C + B(u_a - u_w) + A(u_a - u_w)^2 \quad (8)$$

典型拟合曲线见图10(选1个典型曲线)。

根据拟合出抛物线曲线数值计算出对称轴值  $-B/(2A)$ (如表5所示)。

拟合  $k=0.60, 0.65, 0.70$ 的抛物线的对称轴和  $k$ 值成直线关系,如下式:

$$-B/(2A) = pk + f \quad (9)$$

拟合曲线如图11所示。

结合式(7)、(8)、(9)可以得出径向应变和轴向应变,  $k$ 值与基质吸力的关系,从而能预测径向应变。

表4 线性拟合值

**Table 4 Linear fitting values**

拟合曲线类型	k值	$u_a-u_w$ / kPa	斜率	截距	相关系数
y= ax+b	0.60	0	-0.95022	0.10643	0.91502
		20	-0.59202	0.05394	0.91492
		50	-0.43425	0.03407	0.86540
		100	-0.38276	0.02710	0.86514
0.63	0	-0.55452	0.10233	0.98368	
	30	-0.43658	0.03903	0.98021	
	60	-0.40075	0.03492	0.97537	
0.65	0	-0.65913	0.09271	0.97717	
	50	-0.38976	-0.01898	0.90263	
	20	-0.40038	0.01104	0.98421	
0.68	0	-0.37046	0.03159	0.84201	
	0	-0.70283	0.05593	0.96958	
	30	-0.51331	0.01018	0.98582	
0.70	60	-0.47016	0.02022	0.98187	
	120	-0.40221	0.05840	0.95580	
	0	-1.32347	0.16166	0.98262	
0.70	20	-0.58970	0.03122	0.98826	
	50	-0.58650	0.02961	0.97384	
	100	-0.51296	0.01342	0.98237	

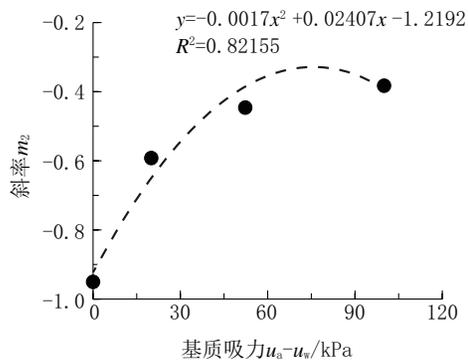


图10 斜率  $m_2$  和基质吸力的值以及拟合曲线  
Fig.10 Slope " $m_2$ ", the values of the matrix suction and the fitting curves at different  $k$  values

表5 对称轴值与  $k$  值

**Table 5 Values of the symmetric axis and the  $k$  values**

k值	0.60	0.63	0.65	0.68	0.70
对称轴值	156.8	34.3	146.5	19.2	141.58

注:对称轴值即为  $-B/(2A)$ 。

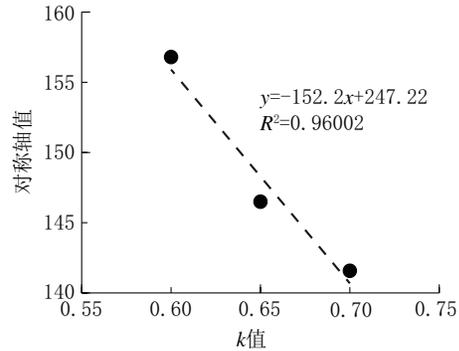


图11  $k$  值与对称轴的关系  
Fig.11  $k$  value vs symmetric axis

### 3 结论

(1)在比例加载条件下的基质吸力平衡过程中,反压排水量有一个明显的转折点,通过转折点判断基质吸力的平衡可以大大缩短时间。

(2)基质吸力作用会“加深”变形,这主要受基质吸力的影响。从作用机理上分析,由于加了基质吸力,土体中有了空气,由于空气的可压缩性,此后的固结就包括气体的压缩,所以致使以后的固结变形加大。这个结论在实际工程中体现为当地下水水位下降后土体在荷载的作用下变形增加,甚至达到临界状态造成地表坍塌。

(3)经分析得出在保持偏应力不变的前提下,增加基质吸力没有引起明显的轴向应变增加;不同基质吸力下的偏应力和净平均应力呈直线关系,其斜率近似为恒应力比。

(4)提出了一种可以预测非饱和比例加载条件下的径向应变的方法。

### 参考文献 (References):

[1] 周晓燕.非饱和黄土的应力路径试验研究[D].西安:西北农林科技大学,2008:36-38.  
ZHOU Xiaoyan. Study on stress path tests of unstraturated loess [D]. Xi'an: Northwest Sci. Tech. University of Agriculture and Forestry, 2008:36-38.

[2] 曾玲玲,陈晓平.软土在不同应力路径下的力学特性分析[J].岩土力学,2009,30(5):1264-1270.  
ZENG Lingling, CHEN Xiaoping. Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(5):1264-1270.

[3] Crispel J J. Mechanical behavior of non-cohesive materials on tri-axial paths of revolution having a constant stress ratio[J]. Ann. Inst. Tech. Batim. Trav. Publics, 1978(357):1-7.

[4] 孙岳崧,濮家骝,李广信.不同应力路径对砂土应力-应变关系

- 影响[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(6): 78-88.  
SUN Yuesong, PU Jialiu, LI Guangxin. Different stress path for sand stress-strain relationship[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 19(6): 78-88.
- [5] 钱建固. 土体塑性各向异性的微宏观机理分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 88-93.  
QIAN Jiangu. Micro-macro mechanistic analysis of plastic anisotropy in soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 88-93.
- [6] 张宁宁, 骆亚生. 重塑黄土等应力比三轴压缩试验研究[J]. 人民黄河, 2014, 32(2): 132-134.  
ZHANG Ningning, LUO Yasheng. Constant stress ratio triaxial compression test on remolded loess[J]. Yellow River, 2014, 32(2): 132-134.
- [7] 谢俊文. 湖南网纹红土的工程地质特性[J]. 环境化学, 1982(2): 5-7.  
XIE Junwen. Geological characteristics of reticulate red clay of Hunan[J]. Environmental Chemistry, 1982(2): 5-7.
- [8] 向春尧. 网纹红土的工程性质与地评价[J]. 水文地质工程地质, 1985, 12(3): 1-8.  
XIANG Chunyao. Geological characteristics and foundation evaluation of reticulate red clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1985, 12(3): 1-8.
- [9] 卓立春, 李建中, 黄飞. 网纹红土微观结构特性的分形研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 62-67.  
ZHUO Lichun, LI Jianzhong, HUANG Fei. Fractal approach on microstructure of the reticulate laterite[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 62-67.
- [10] 王清, 唐大雄. 我国南方中更新世网纹红土的工程地质评价[J]. 工程地质学报, 2000, 8(S1): 330-333.  
WANG Qing, TANG Daxiong. Foundation evaluation of reticulate red clay of the Middle Pleistocene in south China[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(S1): 330-333.
- [11] 何玉荣, 李建中. 网纹红土分级加载与分别加载蠕变试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(2): 62-67.  
HE Yurong, LI Jianzhong. Research on creep of reticulate red clay under stepped-load and constant-load[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(2): 62-67.
- [12] 李建中, 彭芳乐. 黏土的蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 214-218.  
LI Jianzhong, PENG Fangle. Experimental research on creep property of clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 214-218.
- [13] 唐喜青. 洞庭湖地区网纹红土的流变性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 22-25.  
TANG Xiqing. Research on rheological properties of reticulate red clay in Dongting Basin[D]. Changsha: Central South University, 2010: 22-25.
- [14] Sivakumar V. A critical state framework for unsaturated soils[D]. Sheffield: University of Sheffield, 1993: 88-90.
- [15] Zhan L T. Field and laboratory study of an unsaturated expansive soil associated with rain-induced slope instability[D]. Hong Kong: The Hong Kong University of Science and Technology, 2003: 67-69.
- [16] Li J Z, Yan L C, Tang X Q. Simulation on the one-dimensional consolidating deformation of reticulate red clay[C]//The 2nd International Symposium on Information Engineering and Electronic Commerce, Ternopil, Ukraine, 2010: 86-89.
- [17] Li J Z, Tang X Q, Yan L C. Simulation on triaxial compression creep deformation of reticulate red clay[J]. Advanced Materials Research, 2011(261): 1414-1418.
- [18] 徐有娜, 李建中, 赵彬, 等. 饱和重塑网纹红土恒应力比路径下应力应变特性[J]. 工程勘察, 2020, 48(5): 11-14.  
XU Youna, LI Jianzhong, ZHAO Bin, et al. Characteristics of stress and strain on saturated remodeling reticulate red clay under constant stress ratio path[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2020, 48(5): 11-14.
- [19] 徐有娜, 李建中. 基于内蕴时间理论的网纹红土蠕变研究[J]. 勘察科学技术, 2015(3): 1-4.  
XU Youna, LI Jianzhong. Study on creep of reticulated red soil based on endochronic theory[J]. Site Investigation Science and Technology, 2015(3): 1-4.
- [20] 石振明, 刘巍然, 彭铭, 等. 网纹红土土水特征曲线试验研究及其在边坡稳定性评价中的应用[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 164-171.  
SHI Zhenming, LIU Weiran, PENG Ming, et al. Experimental study on soil-water characteristic curve of reticulate red clay and its application in slope stability evaluation[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 164-171.
- [21] 刘弋博, 陈慧娥, 许晓慧, 等. 非饱和增湿条件下典型黄土湿陷性研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 973-981.  
LIU Yibo, CHEN Huie, XU Xiaohui, et al. Laboratory study on collapsibility of typical loess under unsaturated humidified conditions[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(5): 973-981.
- [22] 蒋兵. 九江市网纹红土标准贯入击数与力学参数关系分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10): 89-92.  
JIANG Bing. Analysis on the relationship between the SPT number and mechanical parameters of reticulated laterite in Jiujiang city[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 89-92.
- [23] 冯雪威.  $K_0$ 应力路径试验在上海地区工程勘察中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(4): 70-74, 79.  
FENG Xuewei. Application of  $K_0$  stress path test in engineering investigation in Shanghai[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(4): 70-74, 79.
- [24] 李威, 庄建琦, 王颖. 饱和重塑黄土抗剪强度影响因素的试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(3): 626-632.  
LI Wei, ZHUANG Jianqi, WANG Ying. Experimental study on influencing factors of shear strength of saturated remolded loess[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(3): 626-632.
- [25] 袁志辉, 唐春, 杨普济, 等. 干湿循环下原状黄土抗压强度试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(S1): 155-161.  
YUAN Zhihui, TANG Chun, YANG Puji, et al. Experimental studies of compressive strength of undisturbed loess in dry-wetting cycle[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(S1): 155-161.