

# 红黏土在不同应力路径下的力学特性试验研究<sup>\*</sup>

高彬<sup>1</sup>, 陈筠<sup>2</sup>, 杨恒<sup>1</sup>, 程旭波<sup>1</sup>, 鄢忠虎<sup>3</sup>

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州理工学院 交通工程学院, 贵阳 550003;  
3. 贵州大学 土木工程学院, 贵阳 550025)

**摘 要:**采用应力-应变控制式三轴仪对贵阳市某基坑内的原状和重塑红黏土进行了等压固结和  $K_0$  固结条件下的增  $p$  剪切、减  $p$  剪切、等  $p$  剪切应力路径室内试验, 以研究在不同应力路径下红黏土的力学特性。研究表明, 不同应力路径下红黏土的力学特性有较大的差异, 红黏土对应力路径的敏感性与其自身的结构性有很大关系, 初始固结条件和应力路径对红黏土抗剪强度指标的影响主要表现在对粘聚力的影响上, 而对内摩擦角的影响较小。应力路径是孔隙水压力变化特征的决定因素之一。排水条件对红黏土的变形影响较小, 对其强度值影响明显。对等压固结和  $K_0$  固结剪切结果进行比较, 认为其在两种固结条件下的变形和强度上均存在较大差异。

**关键词:**红黏土; 应力路径;  $K_0$  固结; 力学特性; 孔隙水压力

中图分类号: TU446

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)05-1202-11

## Experimental Study on Mechanical Properties of Red Clay under Different Stress Paths

Gao Bin<sup>1</sup>, Chen Jun<sup>2</sup>, Yang Heng<sup>1</sup>, Cheng Xubo<sup>1</sup>, Wu Zhonghu<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, P.R. China; 2. School of Traffic Engineering, Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550003, P.R. China; 3. College of Architecture and Construction, Guizhou University, Guiyang 550025, P.R. China)

**Abstract:** The stress paths of increasing  $P$  shear, decreasing  $P$  shear and equal  $P$  shear in a foundation pit in Guiyang were studied by means of stress-strain control triaxial instrument under the condition of isobaric consolidation and  $K_0$  consolidation. The mechanical properties of red clay under different stress paths were studied. The results show that there are great differences in the mechanical properties of red clay under different stress paths, and the sensitivity of red clay to stress paths is closely related to its own structure. The influence of initial consolidation conditions and stress paths on the shear strength of red clay is mainly on the cohesion, but the influence on the angle of internal friction is small. Stress path is one of the decisive factors of pore water pressure change. The drainage condition has little effect on the deformation of red clay and obvious influence on its strength. By comparing the shear results of isobaric consolidation and  $K_0$  consolidation, it is concluded that there are great differences in deformation and strength between the two consolidation conditions.

**Keywords:** red clay; stress path;  $K_0$  consolidation; mechanical properties; pore water pressure

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-01-17(修改稿)

作者简介: 高彬(1994-), 男, 宁夏中卫人, 硕士生, 主要从事岩土工程性质与应用的方面研究。

E-mail: 1396582103@qq.com

通讯作者: 陈筠(1970-), 女, 贵州贵阳人, 硕士, 副教授, 主要从事区域稳定与岩体稳定、岩溶工程地质、边坡工程等方面的研究。E-mail: 409272271@qq.com

基金项目: 贵州省科学技术基金(黔科合J字[2015]2033号); 贵大人才引进项目(贵大人基合字[2017]63号)

## 0 引言

Lambe<sup>[1]</sup>于1967年最早提出了应力路径的概念。在最初研究阶段,主要是研究沙土等无粘性土的应力路径力学特性<sup>[2-4]</sup>。随着研究进展不断深入以及工程建设的需要,粘性土在应力路径方面的研究越来越得到重视,近些年来也取得了显著的进展。刘元雪等<sup>[5]</sup>、孔令伟等<sup>[6]</sup>通过对多种应力路径下的原状与重塑粘土进行室内试验,来揭示结构性原状土体的在不同应力路径下的力学特性。王晓燕等<sup>[7]</sup>根据基坑开挖的应力路径特点,对粉质粘土在多应力路径下的应力-应变特征进行了研究。黄勇等<sup>[8]</sup>进行了不同温度下饱和软粘土的应力路径试验研究。

红黏土是一种区域性特殊土类,同时其物理力学性质具有明显的地域特征,在贵州省主要人口集中的地区广泛分布<sup>[9]</sup>,因此,众多工程建设中往往会遇到红黏土这类特殊土。长期以来,关于红黏土的力学性质研究大多基于各向等压条件下的常规

三轴试验。事实上,红黏土的力学性质与实际工况条件有关,不同部位土体的应力路径不同,其应力应变关系不尽相同。故根据实际工程中土体所经历的应力路径进行试验研究得到可靠的试验参数对于确保工程的安全有重要意义。本文采用应力-应变控制式三轴仪对原状和重塑红黏土分别进行了不同固结条件和不同应力路径(增 $p$ 剪切、减 $p$ 剪切、等 $p$ 剪切)条件下的三轴固结不排水和固结排水室内试验,探讨应力路径、排水条件、固结状态的不同对贵州红黏土力学参数的影响。

## 1 试验方案

### 1.1 试验样品基本物理力学参数

本次试验所选土样取自贵阳市某公路基坑,深度为3~10 m,土体呈褐红色,土质均匀,无碎石等杂质,具有一定的代表性。为进行充分对比,分别选取了原状和扰动红黏土。重塑土制备时含水率和密度的期望值根据原状土的均值确定。上述原状和重塑红黏土的物理力学性质指标如表1。

表1 红黏土的物理力学性质指标

Table 1 Physico-mechanical properties of red clay

土样	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$\omega/\%$	$S_r/\%$	$G$	$\omega_L/\%$	$\omega_p/\%$	$I_L$	$I_p$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/\text{kPa}$
原状土	1.743	65.4	98.58	2.44	80.5	45.5	0.557	35	13.9	15.01
重塑土	1.743	65.7	98.35						5.7	19.6

### 1.2 应力路径试验方案

本次试验所用仪器为SLB-1型应力应变控制式三轴剪渗仪。具体试验步骤为:首先根据所取土样的初始应力状态,确定试验围压及轴压值,本次试验中固结方式选取等压固结和 $K_0$ 固结两种固结方式, $K_0$ 固结值根据经验值选取0.7,固结围压终值选取200、300、400 kPa。剪切控制方式为应力控制。试验设计了模拟堆载过程的常规三轴压缩试验(CTC)、侧向开挖卸荷过程的减压三轴压缩试验(RTC)、侧向卸荷轴向加荷过程的平均主应力 $p$ 为常数的3轴压缩试验(TC)3种应力路径,考虑到基坑开挖时的快慢导致土体排水情况不同,按照上述3种应力路径进行了大量的排水剪与不排水剪试验。具体试验方案如表2所示。

## 2 试验结果分析

### 2.1 不同应力路径对原状红黏土变形-强度特性的影响

#### 2.1.1 应力路径对原状红黏土应力-应变关系的影响

在不排水条件下,由图1可得如下结论:①在等压固结条件下,当初始固结围压较低时,3种应力路径的剪应力峰值比较接近(图1(a)),当围压增大时,剪切强度峰值也随围压增大,同时红黏土对应力路径的敏感性增强,表现出减 $p$ (RTC)、等 $p$ (TC)、增 $p$ (CTC)剪切路径所获得的剪应力峰值依次递增的规律(图1(c)、(e));②在 $K_0$ 固结条件下,相比于等压固结,红黏土对应力路径的敏感性

表 2 应力路径试验方案  
Table 2 Experimental scheme of stress path

土样	试验编号	固结过程			剪切过程		
		固结方式	固结围压终值/kPa		$K_0$ 值	应力路径	剪切速率/ (kPa · min <sup>-1</sup> )
			$p=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$	$q=\sigma_1-\sigma_3$			
原状土	CUCTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>	等压固结	200	0	1.0	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CUCTC <sub>1.0</sub> <sup>300</sup>	等压固结	300	0	1.0	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CUCTC <sub>1.0</sub> <sup>400</sup>	等压固结	400	0	1.0	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CUCTC <sub>0.7</sub> <sup>200</sup>	$K_0$ 固结	200	75	0.7	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CUCTC <sub>0.7</sub> <sup>300</sup>	$K_0$ 固结	300	113	0.7	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CUCTC <sub>0.7</sub> <sup>400</sup>	$K_0$ 固结	400	150	0.7	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CDCTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>	等压固结	200	0	1.0	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.1$
	CDCTC <sub>1.0</sub> <sup>400</sup>	等压固结	400	0	1.0	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.1$
	CDCTC <sub>0.7</sub> <sup>200</sup>	$K_0$ 固结	200	75	0.7	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.1$
	CDCTC <sub>0.7</sub> <sup>400</sup>	$K_0$ 固结	400	113	0.7	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.1$
重塑	* CUCTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>	等压固结	200	0	1.0	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	* CUCTC <sub>0.7</sub> <sup>200</sup>	$K_0$ 固结	200	75	0.7	$\Delta\sigma_3=0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
原状土	CURTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>	等压固结	200	0	1.0	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.3$
	CURTC <sub>1.0</sub> <sup>300</sup>	等压固结	300	0	1.0	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.3$
	CURTC <sub>1.0</sub> <sup>400</sup>	等压固结	400	0	1.0	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.3$
	CURTC <sub>0.7</sub> <sup>200</sup>	$K_0$ 固结	200	75	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.3$
	CURTC <sub>0.7</sub> <sup>300</sup>	$K_0$ 固结	300	113	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.3$
	CURTC <sub>0.7</sub> <sup>400</sup>	$K_0$ 固结	400	150	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.3$
	CDRTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>	等压固结	200	0	1.0	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.1$
	CDRTC <sub>1.0</sub> <sup>400</sup>	等压固结	400	0	1.0	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.1$
	CDRTC <sub>0.7</sub> <sup>200</sup>	$K_0$ 固结	200	75	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.1$
	CDRTC <sub>0.7</sub> <sup>400</sup>	$K_0$ 固结	400	150	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.1$
重塑	* CURTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>	$K_0$ 固结	200	75	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.3$
	* CURTC <sub>0.7</sub> <sup>200</sup>	$K_0$ 固结	300	113	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1=0$	$\Delta q=0.3$
原状土	CUTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>	等压固结	200	0	1.0	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CUTC <sub>1.0</sub> <sup>300</sup>	等压固结	300	0	1.0	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CUTC <sub>1.0</sub> <sup>400</sup>	等压固结	400	0	1.0	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CUTC <sub>0.7</sub> <sup>200</sup>	$K_0$ 固结	200	75	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CUTC <sub>0.7</sub> <sup>300</sup>	$K_0$ 固结	300	113	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CUTC <sub>0.7</sub> <sup>500</sup>	$K_0$ 固结	400	150	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	CDTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>	等压固结	200	0	1.0	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.1$
	CDTC <sub>1.0</sub> <sup>400</sup>	等压固结	400	0	1.0	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.1$
	CDTC <sub>0.7</sub> <sup>400</sup>	$K_0$ 固结	400	150	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.1$
重塑	* CUTC <sub>1.0</sub> <sup>200</sup>	$K_0$ 固结	200	75	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$
	* CUTC <sub>0.7</sub> <sup>200</sup>	$K_0$ 固结	300	113	0.7	$\Delta\sigma_3<0;\Delta\sigma_1>0$	$\Delta q=0.3$

注:CU 表示固结不排水剪试验,CD 表示固结排水剪试验,CTC 表示常规三轴压缩,RTC 表示减压三轴压缩,TC 表示  $P$  为常数的三轴压缩试验,\* 表示重塑土,上标表示固结压力终值,下标表示固结应力比  $\sigma_3/\sigma_1$ 。

明显增强,3种应力路径下的剪切峰值同等压固结条件下的一致。值得一提的是,减 $p$ (RTC)剪切路径的剪应力峰值明显低于其他两种应力路径下的剪切强度峰值,在本次试验中,其抗剪强度值平均低于增 $p$ 路径的28%左右(图1(b)、(d)、(f));③对比两种固结方式下的应力应变曲线发现,相同围压同一应力路径下, $K_0$ 固结条件下所得到的剪应力峰值均大于等压固结下的剪应力峰值。另外,在 $K_0$ 固结条件下,在应变达到1%之前,3种应力路径下的 $q$ 值增长速率一致,应变达到1%之后,主应力

差的增长速率表现出差异性,对应力路径的敏感性得到体现,在应变达到2%时,减 $p$ 路径剪应力达到峰值,当应变达到3%时,等 $p$ 、增 $p$ 路径剪应力相继达到峰值。而在等压固结条件下,剪切初始阶段3种应力路径的 $q$ 值增长速率不一致,在应变达到5%时,3种应力路径剪应力强度达到峰值;④两种固结条件下的应力-应变关系均呈应变软化特征,土样表现出的变形特征同理想弹塑性材料相似。

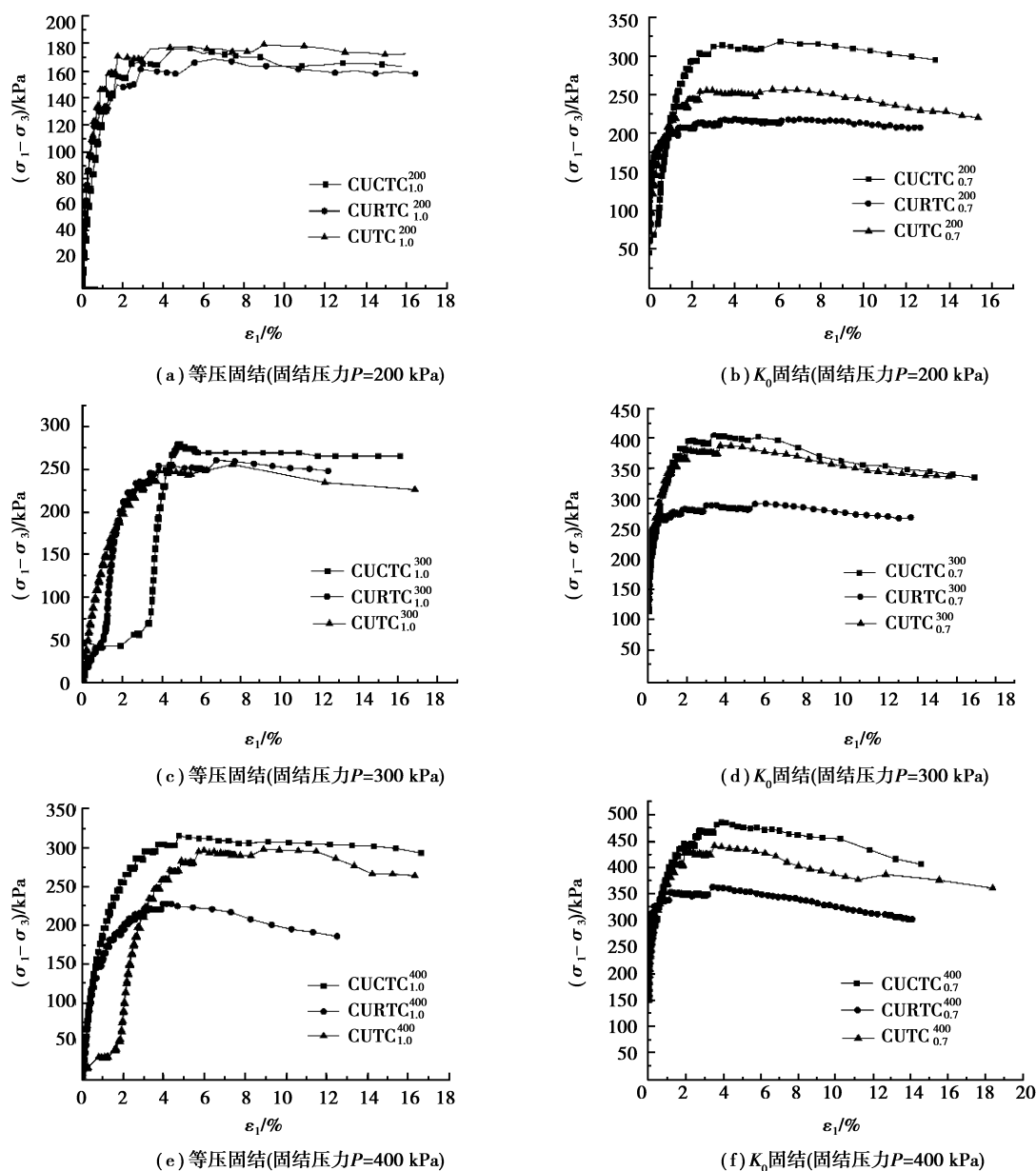


图1 不同应力路径下原状红黏土在固结不排水剪切阶段应力-应变关系曲线

Fig.1 Stress-strain relationship curves of undrained shear stage of undrained unconsolidated red clay under different stress paths

在排水条件下,红黏土在不同应力路径下的应力应变关系如图2所示,其应力应变曲线特征同上述不排水条件下的②、③、④一致,这里不再赘述。不同与不排水情况的是,通过对比 CU 与 CD 试验强度指标发现,相同围压下,CD 试验的剪应力峰

值均大于 CU 试验的剪应力峰值。

图1、图2在一定程度上可以说明红黏土对应力路径的依赖性与其结构性有关,即随着变形增大,其结构性不断遭到破坏,对应力路径的敏感性会越来越明显。

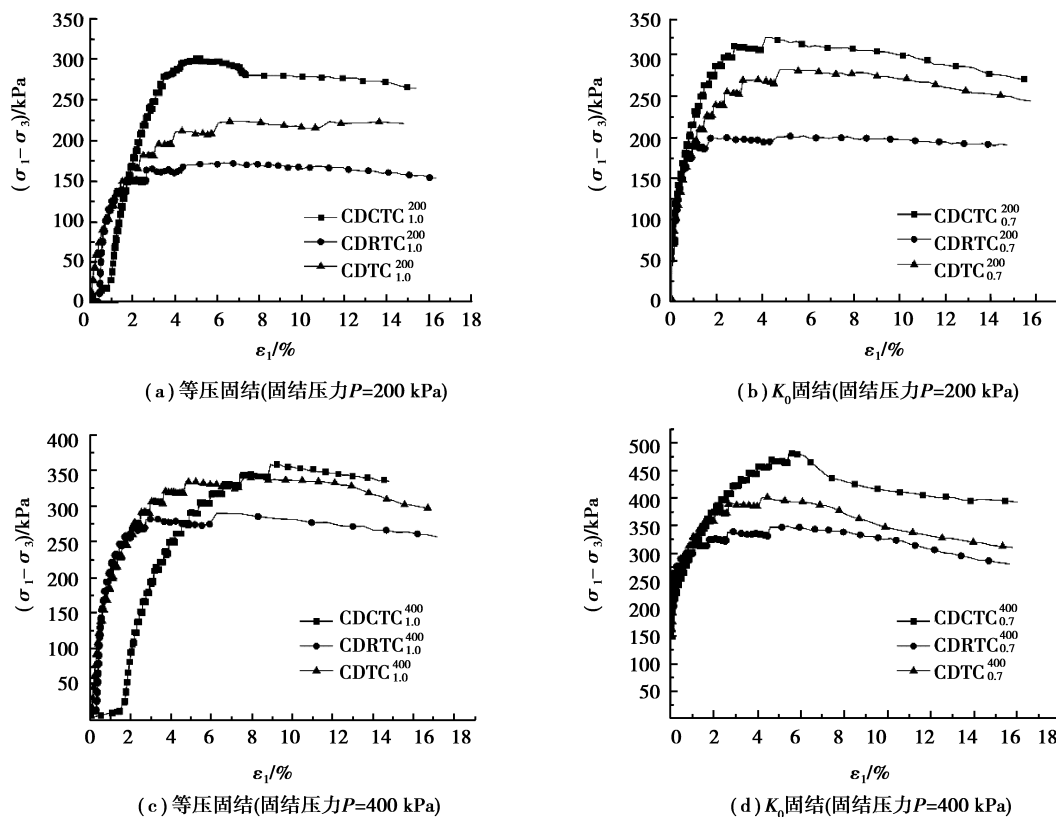


图2 不同应力路径下原状红黏土在固结排水剪切阶段应力-应变关系曲线

Fig.2 Stress-strain relationship curves of undisturbed red clay at consolidation and drainage shear stage under different stress paths

### 2.1.2 应力路径对原状红黏土孔隙水压力的影响

原状红黏土在不同应力路径下的孔隙水压力的变化特征如图3所示。通过对比发现:①孔隙水压力对应力路径表现出很强的敏感性,其不同应力路径下的孔隙水压力变化特征明显不同,不同的应力路径是其孔压特征的决定性因素之一;②相同围压下,3种应力路径的孔隙水压力大小与3种应力路径对应的剪应力峰值大小规律一致;③CTC路径下,孔隙水压力大小与初始固结围压大小有关,初始固结围压越大,孔隙水压力就越大,而等 $p$ 路径和减 $p$ 路径由于在剪切过程中伴随着侧向围压的卸荷过程,所以两者没有明显的对应关系。④孔隙水压力变化规律与土体变形强度特征有对应关系,红黏土在经历了弹性变形、屈服变形达到

屈服强度以前,随着土体形变的增加,增 $p$ 、等 $p$ 路径下的孔隙水压力会迅速增加,减 $p$ 路径孔隙水压力会下降或者先略微上升随后下降出现负值。当土体对应的变形破坏过程至塑性破坏时,增 $p$ 、等 $p$ 路径下的孔隙水压力都基本保持不变呈水平直线状态,而减 $p$ 路径下的孔隙水压力仍然会有一定程度的下降过程。

在增 $p$ 、等 $p$ 剪切路径下,当对土体施加偏应力剪切时,当试样未达到临界孔隙比时,土体体积有减少的趋势(减缩),由于是在不排水条件下,所以相应地产生了值为正数的孔隙水压力。随着剪切的进行,当试样处于临界孔隙比时,试样的体积基本没有变化的趋势,随之孔隙水压力也没有明显的增加趋势,保持不变的状态。而减 $p$ 路径下,围



压的不断卸荷过程中土体侧向的应力值不断减少,随着主应力差的不断增大,土体体积发生了微弱的局部膨胀(剪胀),这时虽然为不排水条件下的剪切,但土体发生微弱的剪胀之后,土体局部密度增大,孔隙比增大,遂产生绝对值较小的负压,表现出的力学特性为该应力路径下的剪切峰值强度较低。通常情况下,认为细粒土、粘土等发生剪胀是由于超固结试样土体在受剪时发生的弹性膨胀<sup>[10]</sup>,但本次试验结果发现,在土体经历了屈服强度之后,减 $p$ 路径下的红黏土的孔隙水压力仍然会有一定

程度的下降(图 3(a)、(b)、(c)、(d)),这个阶段土体已经经历完了弹性变形阶段进入了塑性破坏阶段,土体不再出现弹性膨胀。故认为这是红黏土特殊的结构性表现出的土体膨胀不可恢复的体现,是一种塑性破坏,即红黏土在卸荷过程中其结构会遭到破坏,且这种破坏不可恢复。所以认为红黏土在开挖卸荷状态下,其开挖剖面侧向土体会发生一定程度的剪胀特性,出现负压,此种情况下土体的稳定性较差,应及时给予必要的防护措施。

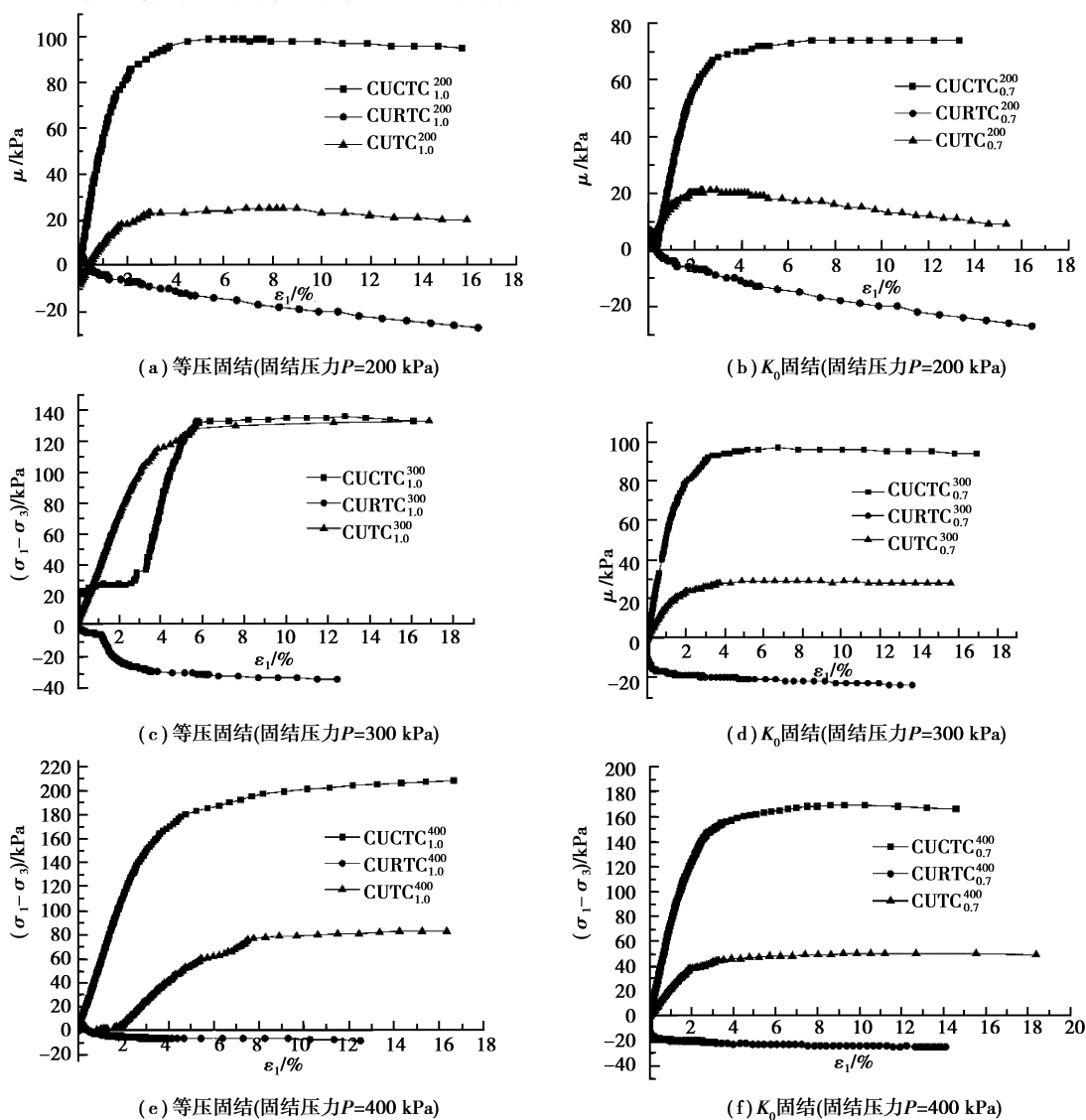


图 3 不同应力路径下原状红黏土在固结不排水剪切阶段孔压-应变关系曲线

Fig.3 Relationship curves between pore pressure and axial strain in undrained shear stage of red clay under different stress paths

## 2.2 不同应力路径对重塑红黏土变形-强度特性的影响

### 2.2.1 应力路径对重塑红黏土应力-应变关系的影响

重塑红黏土在不同应力路径下的应力-应变关系曲线如图4所示。由图4可得如下结论:①与原状土的应力路径剪切结果相比较,重塑红黏土对应力路径的敏感性低于原状红黏土,相同初始固结围压下3种应力路径的剪应力峰值大小同原状土所表现出的规律一致(图1(a)(b));②在等压固结条件下,剪切初始阶段,土体应变较大,在应变超过

2%后,主应力差急剧增长,当应变超过7%时达到剪切峰值,此时曲线趋于平缓(图4(a)),而在 $K_0$ 固结条件下,剪切初始阶段主应力差就急剧增长,应变超过5%时达到峰值强度,此后曲线趋于平缓。这说明 $K_0$ 固结条件下土体颗粒在固结的过程中已经完成了一些变化,使得土体颗粒之间的排列从疏松且无规律逐步趋于紧密且有规律的排列,ODA等<sup>[11]</sup>认为粘土的这种排列在微观上表现出的结构性为柱状结构。因此,在宏观上表现出 $K_0$ 固结条件的弹性变形小于等压固结条件下的弹性变形的现象。

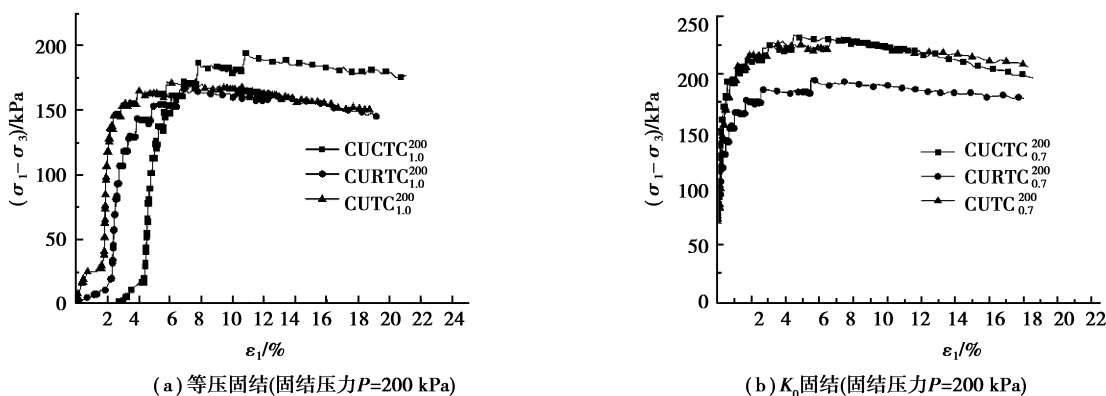


图4 不同应力路径下重塑红黏土在固结不排水剪切阶段应力-应变关系曲线

Fig.4 Stress-strain relationship curves of remolded red clay at undrained shear stage under different stress paths

笔者认为,出现上述试验现象的原因是红黏土作为一种结构性特殊土,其重塑过程中土体结构遭到了一定程度的破坏。重塑红黏土的制样过程经历了磨碎—过筛—烘干—重新击实几个步骤,这使得重塑红黏土的胶结作用降低、颗粒连接变弱、孔隙变大,土体颗粒各向异性减弱,受压时伴随着结构塌陷,表现出压缩性变大,力学强度较低的特点。

同时,由于这种各向异性的减弱使得土体对红黏土的敏感性减弱,这说明红黏土对应力路径的依赖性与其自身的结构性有很大的关系,其结构性会直接影响到工程的可靠性。

### 2.2.2 应力路径对重塑红黏土孔隙水压力的影响

重塑红黏土在不同应力路径下的孔压特征如图5所示。由图5可知:①在等压固结下,重塑红

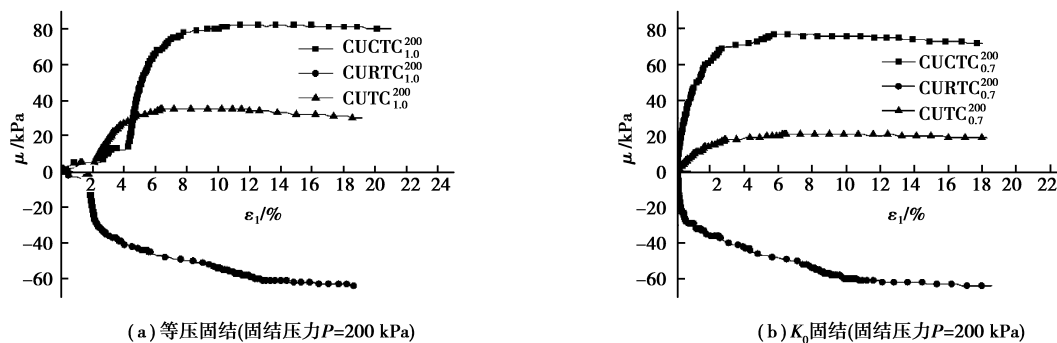


图5 不同应力路径下重塑红黏土在固结不排水剪切阶段孔压-应变关系曲线

Fig.5 Pore pressure-strain relationship curves of remolded red clay at undrained shear stage under different stress paths

黏土在剪切初始阶段塑性变形较大,对应着其孔隙水压力增长平缓,随后当主应力差快速增加时,孔隙水压力也快速增加(图5(a)),而 $K_0$ 固结条件下的土体在剪切初始阶段孔隙水压力变化规律明显,这与其剪切时的剪应力变化规律一致。两种固结条件下的土体达到塑性破坏后孔隙水压力均基本保持不变。这再次说明土体孔隙水压力与土体的变形特征有关;②与原状土相比,相同围压下重塑土减 $p$ 路径孔隙水压力绝对值明显大于原状土的孔隙水压力绝对值,且其在土体破坏后孔隙水压力下降的趋势更加明显(图5(a)、(b)图3(a)、(b)、(c)、(d)),这再次说明红黏土结构损伤对其力学性质有很大的影响,且卸荷过程会破坏土体的结构性,这种不可恢复的结构破坏程度越大,使得其颗粒各向异性越弱、胶结作用越低,导致土体在侧向卸荷过程中结构崩塌,产生更强的剪胀趋势,在宏观上表现出绝对值较大的负孔隙水压力。

## 2.3 应力路径及强度特性

### 2.3.1 不排水应力路径

图6为土体在等压固结与 $K_0$ 固结不排水条件下的应力路径在 $p$ - $q$ 坐标系中的关系图。从图中可看到:①同一应力路径下土体经历剪切后的有效应力路径具有明显相似性;②土体在经历剪切过程中,在弹性变形阶段有效应力路径与总应力路径趋势相同,接近重合。随着剪切过程的进行,同一剪应力下有效应力路径与总应力路径差值逐步增大,在土体变形破坏达到塑形破坏阶段后,孔隙水压力达到最大,对应着同一剪应力下的有效应力路径与总应力差值达到最大;③增 $p$ 路径与等 $p$ 路径在剪切过程中产生值为正的静孔隙水压力,有效应力路径在总应力路径左侧,减 $p$ 路径在剪切过程中产生值为负的静孔隙水压力,有效应力路径在总应力路径的右侧。

### 2.3.2 不排水强度特性

图7为不同应力路径下土体的总应力包线和有效应力包线。结果表明:①3种应力路径所获得的强度指标 $c$ 值和 $\varphi$ 值不尽相同,减 $p$ 路径下得到的 $c'$ 都大于增 $p$ 路径和等 $p$ 路径所得的值,而 $\varphi'$ 值介于增 $p$ 路径和等 $p$ 路径得到的 $\varphi'$ 值之间(表3)。这说明应力路径对红黏土的抗剪强度有一定的影响,尤其是当侧向卸荷时影响最大。因此,在实际工程中,设计红黏土基坑或者公路边坡的侧向开挖土体的支护设计时,利用常规三轴试验得到的力学参数是不合理的,应当根据土体实际经历的应力路径来进行计算设计。②两种固结方式下,总应力路

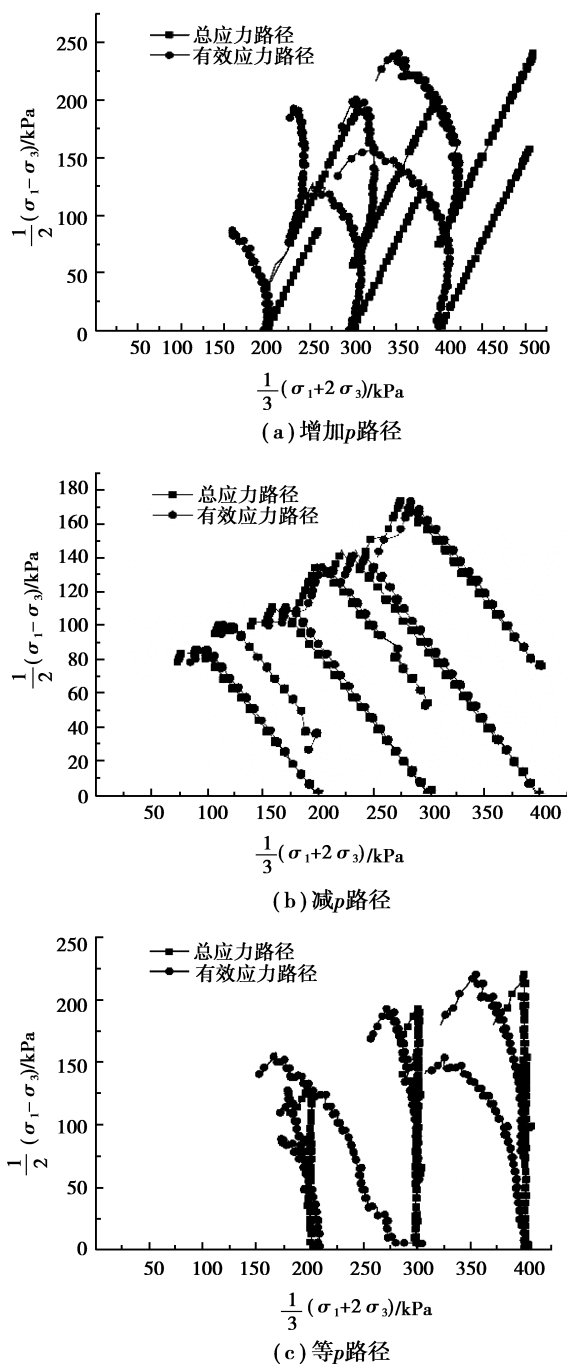


图6 不同应力路径下原状红黏土在固结不排水剪切过程的有效应力路径

Fig.6 Effective stress paths of undrained shear processes of undrained unconsolidated red clay under different stress paths 径强度指标 $\varphi$ 值与 $\varphi'$ 值比较接近,而 $c$ 值与 $c'$ 值之间差异较大。这说明不同应力路径加卸载过程对强度指标中粘聚力的影响较大,而对内摩擦角影响较小。③不难发现, $K_0$ 固结条件下的粘聚力值均大于等压固结条件下得到的粘聚力值,而内摩擦角大小不一,没有明显的规律性(表3)。这说明红黏土的结构性对其力学强度特性影响很大, $K_0$ 固结



不同与等压固结,前者使得土体的颗粒排列更加稳定,结构性增强,即初始固结状态对红黏土的抗剪强度有一定的影响,且影响主要来自对粘聚力值上,对内摩擦角值影响较小。④通过对比不同应力

路径下试样有效应力路径发现,尽管土体在不同应力路径下的应力应变表现出较大差异,但其有效应力路径相差很小,这说明红黏土的有效应力路径具有唯一性。

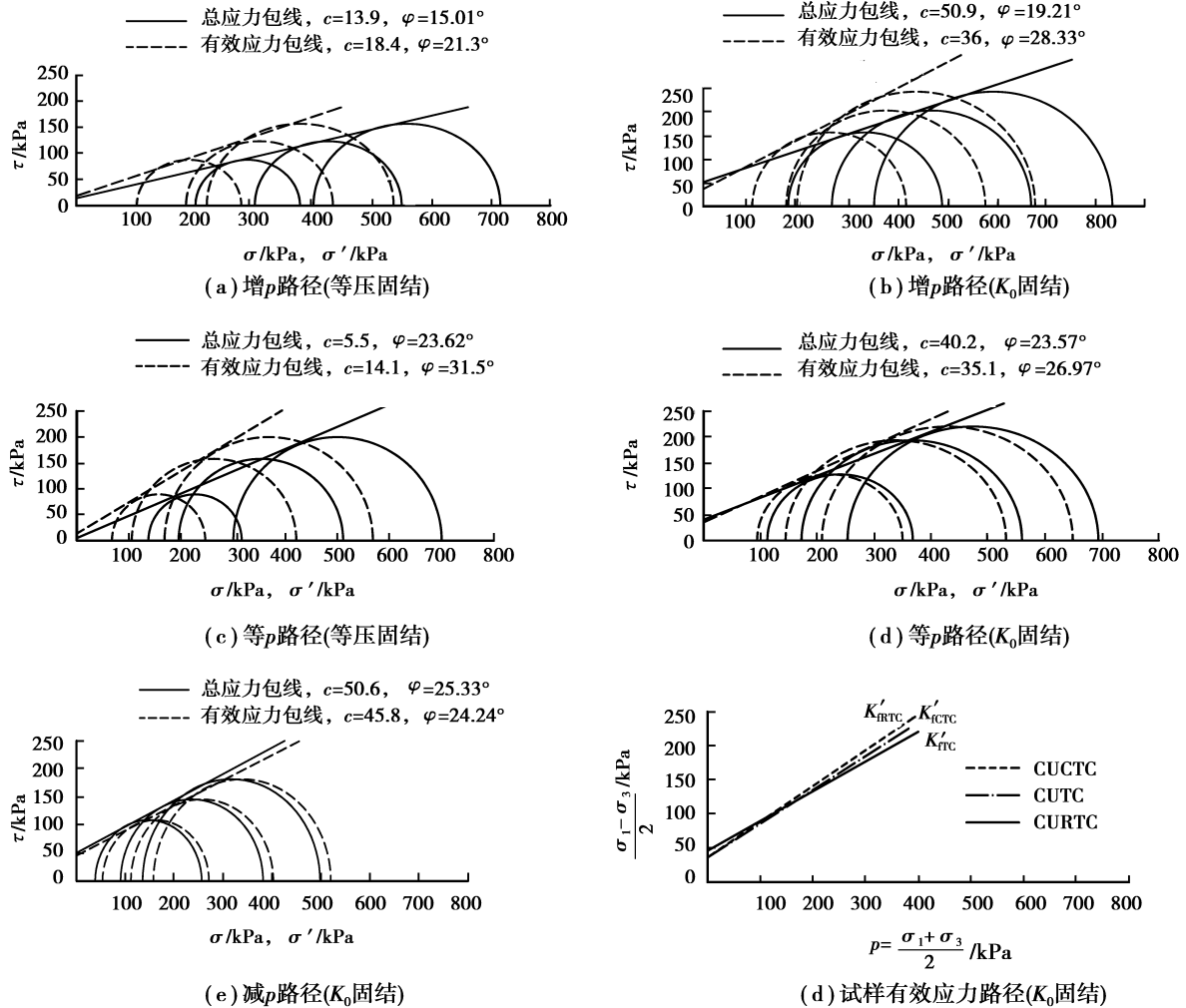


图7 不同应力路径下原状红黏土在固结不排水剪切过程的强度包线

Fig.7 Strength envelope of undrained shear process of undrained unconsolidated red clay under different stress path

表3 不同应力路径下原状红黏土抗剪强度指标

Table 3 Shear strength index of undisturbed red clay under different stress paths

试验编号	应力路径	总应力强度指标		有效应力强度指标	
		$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{°})$	$c'/\text{kPa}$	$\varphi'/(\text{°})$
CUCTC	等压固结	13.9	15.01	18.4	21.3
CUTC	等压固结	5.5	23.62	14.1	31.5
CURTC	等压固结	36	25.23	25.4	29.8
CUCTC	$K_0$ 固结	50.9	19.21	36	28.33
CUTC	$K_0$ 固结	40.2	23.57	35.1	26.97
CURTC	$K_0$ 固结	50.6	25.33	45.8	24.24

### 3 结论

(1)不同应力路径下红黏土的应力-应变曲线变化特征不同。同一固结条件下,3种应力路径剪应力峰值大小依次为增 $p$ 路径、等 $p$ 路径和减 $p$ 路径。其中减 $p$ 路径下的剪应力峰值强度值低于增 $p$ 路径剪应力峰值强度值的28%左右。 $K_0$ 固结与等压固结相比, $K_0$ 固结在其固结过程中土体颗粒排列更加稳定,土颗粒咬合更好,在同一应力路径相同围压下 $K_0$ 固结条件下的剪切应力峰值大于等压固结条件下的剪应力峰值。

(2)不排水条件下,红黏土对应力路径的敏感性与其初始固结围压大小有关,初始围压越大,对其依赖性越高。相同条件下,CD试验的剪切峰值大于CU试验。

(3)不同应力路径下孔隙水压力变化规律不同,孔隙水压力变化特征与其应力-应变关系曲线变化规律一致,同所经历的变形强度特征有对应关系,应力路径是孔压曲线变化特征的决定因素之一。

(4)不同应力路径和初始固结条件对红黏土抗剪强度指标有一定的影响,且主要表现在对粘聚力的影响,而对内摩擦角的影响较小。

(5)原状红黏土在 $K_0$ 固结下减 $p$ 路径剪应力达到峰值强度时对应的应变值为2%,增 $p$ 路径、等 $p$ 路径对应的应变值为3%,而等压固结下减 $p$ 路径为3%,增 $p$ 路径、等 $p$ 路径为5%;重塑红黏土 $K_0$ 固结条件下3种应力路径剪应力达到峰值强度时对应的应变值为5%,而等压固结条件下为7%。红黏土物理力学性质具有很强的地域性,其它地区红的黏土还需根据试验确定。

(6)红黏土对应力路径的依赖性与其自身的结构性有很大关系,其结构性会直接影响到工程的可靠性,结构性越完整对应力路径越敏感。侧向卸荷过程会破坏土体的结构,且这种破坏不可恢复,此种情况下土体的稳定性差,应及时给予必要的防护措施。另外,红黏土在卸载过程中的破坏机理比较复杂,有待进一步研究。

### 参考文献(References)

[1] Lambe T W. Stress path method[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1967, 93(SM6):

309-331.

- [2] Lade P V, Duncan J M. Stress-path dependent behavior of cohesionless soil [J]. Proc Asce, 1976, 102(1): 51-68.
- [3] 孙岳裕,李广信.不同应力路径对砂土应力-应变关系的影响[J].岩土工程学报,1987,9(6):78-87.(Sun Yueyu, Li Guangxin. Effect of different stress paths on the stress-strain relationship of sand and soil [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(6): 78-87. (in Chinese))
- [4] Anderson S A, Riemer M F. Collapse of saturated soil due to reduction in confinement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1995, 121(2):216-220.
- [5] 刘元雪,施建勇,伊颖锋.一种原状欠压密土的力学特性实验研究[J].岩土力学,2004,25(1):5-9.(Liu Yuanxue, Shi Jianyong, Yi Yingfeng. Experimental study on mechanical properties of a kind of undisturbed undercompacted soil [J]. Rock and Soil mechanics. (in Chinese))
- [6] 孔令伟,臧濛,郭爱国,等.湛江强结构性黏土强度特性的应力路径效应[J].岩土力学,2015,36(增1):19-24.(Kong Lingwei, Zang Meng, Guo Aiguo, et al. Stress path effect of strength characteristics of Zhanjiang strong structural clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(Supp.1):19-24. (in Chinese))
- [7] 王晓艳,陈峰,蔡永昌.粉质黏土在不同应力路径下剪切变形特性研究[J].隧道建设,2011(增1):192-196.(Wang Xiaoyan, Chen Feng, Cai Yongchang. Shear deformation characteristics of silty clay under different stress paths [J]. Tunnel Construction, 2011, (Supp.1):192-196. (in Chinese))
- [8] 黄勇,刘干斌,祁良,等.不同温度下饱和软黏土应力路径试验研究[J].水文地质工程地质,2016,43(2):83-87.(Huang Yong, Liu Ganbin, Qi Liang, et al. Experimental study on stress path of saturated soft clay at different temperatures [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2016, 43(2): 83-87. (in Chinese))
- [9] 廖义玲,朱立军.贵州碳酸盐岩红土[M].贵阳:贵州人民出版社,2004.(Liao Yiling, Zhu Lijun. Carbonate laterite in Guizhou [M]. Guiyang: Guizhou people's Press, 2004. (in Chinese))
- [10] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.(Li Guangxin. Higher soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press. 2004. (in

- Chinese))
- [11] Oda M, Kazama H. Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils [J]. *Geotechnique*, 1998, 48(4): 465-481.
- [12] 赵亦婷, 左双英, 刘明发, 等. 贵阳红黏土变形及强度特性试验研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2017, 43(3): 54-58, 66. (Zhao Yiting, Zuo Shuangying, Liu Mingfa, et al. Experimental study on deformation and strength characteristics of Guiyang red clay [J]. *Sichuan Architectural Science Research*, 2017, 43(3): 54-58, 66. (in Chinese))
- [13] 黄质宏, 朱立军, 蒲毅彬. 三轴应力条件下红黏土力学特性动态变化的 CT 分析[J]. *岩土力学*, 2004, 25(8): 1215-1219. (Huang Zhihong, Zhu Lijun, Pu Yibin. Three axis mechanical properties of red clay under the condition of dynamic force CT analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(8): 1215-1219 (in Chinese))
- [14] 黄英, 何发祥, 赵惠敏. 不同应力路径对红土三轴剪切试验成果的影响[J]. *云南工业大学学报*, 1999, 15(1): 8-13. (Huang Ying, He Faxiang, Zhao Huimin. Effect of different stress paths on triaxial shear test results of laterite [J]. *Journal of Yunnan University of Technology*, 1999, 15(1): 8-13. (in Chinese))
- [15] 陈林靖, 戴自航, 刘志伟. 应力路径对软土应力-应变特性影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(11): 3249-3257. (Chen Lingjing, Dai Zihang, Liu Zhiwei. Experimental study on the influence of stress path on stress-strain characteristics of soft soil [J]. *Geotechnical Mechanics*, 2011, 32(11): 3249-3257. (in Chinese))
- [16] 陈筠, 赵鹏, 何维锋, 等. 碱污染红黏土抗剪强度特性室内试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2017, 34(12): 94-100. (Chen Yun, Zhao Peng, He Weifeng, et al. Laboratory study on shear strength characteristics of alkali contaminated red clay [J]. *Journal of the Yangtze River Academy of Sciences*, 2017, 34(12): 94-100. (in Chinese))
- [17] 王麒, 陈筠, 赵鹏, 等. 碱污染红黏土物理性质及微观结构试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(6): 1483-1492. (Wang Qi, Chen Yun, Zhao Peng, et al. Experimental study on physical Properties and microstructure of alkali contaminated red clay [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(6): 1483-1492. (in Chinese))
- [18] 赵鹏, 陈筠, 何维锋, 等. 碱污染红黏土土工试验方法温度效应影响研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(16): 122-127. (Zhao Peng, Chen Yun, He Weifeng, et al. Study on the effect of temperature on Soda contaminated red clay soil [J]. *Science, Technology and Engineering*, 2017, 17(16): 122-127. (in Chinese))

#### (上接第 1184 页)

- [8] 胡波, 赵海滨, 王思敬, 等. 隧道锚围岩拉拔模型试验研究及数值模拟[J]. *岩土力学*, 2009, 30(6): 1575-1582. (Hu Bo, Zhao Haibin, Wang Sijing, et al. Pull-out model test for tunnel anchorage and numerical analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(6): 1575-1582. (in Chinese))
- [9] 肖本职, 吴相超, 彭朝全. 重庆鹅公岩大桥隧道锚碇围岩稳定性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(增2): 5591-5597. (Xiao Benzhi, Wu Xiangchao, Peng Chaoquan. Stability of the anchorage wall rock of tunnel for Chongqing Egongyan Bridge [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(Supp.2): 5591-5597. (in Chinese))
- [10] 庞正江, 孙豪杰, 赖其波, 等. 1:10 隧道锚缩尺模型的变形及应力特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增2): 3972-3978. (Pang Zhengjiang, Sun Haojie, Lai Qibo, et al. Deformation and stress characteristics of tunnel-type anchorage model on scale 1:10 [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Supp.2): 3972-3978. (in Chinese))
- [11] 汤华, 熊晓荣, 吴振君, 等. 隧道锚抗拔作用机理的室内模型试验[J]. *上海交通大学学报*, 2015, 49(7): 935-945. (Tang Hua, Xiong Xiaorong, Wu Zhenjun. Laboratory model test study of pull out mechanism of tunnel anchorage [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2015, 49(7): 935-945. (in Chinese))
- [12] 余美万, 张奇华, 喻正富, 等. 基于夹持效应的普立特大桥隧道锚现场模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(2): 261-270. (Yu Meiwang, Zhang Qihua, Yu Zhengfu, et al. Field model experiment on clamping effect of tunnel-type anchorage at Puli Bridge [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(2): 261-270. (in Chinese))