

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.S1.004

# 湛江强结构性黏土强度特性的应力路径效应

孔令伟<sup>1</sup>, 臧 濛<sup>1</sup>, 郭爱国<sup>1</sup>, 拓勇飞<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;  
2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司 隧道与地下工程设计院, 湖北 武汉 430056)

**摘 要:** 为探讨湛江强结构性原状土与相应重塑土在不同应力路径下的强度特性及其与结构性的关联性, 开展了在不同固结条件下的主动压缩、被动压缩、主动伸长 3 种应力路径试验, 分析了该强结构性黏土在不同应力条件下的力学性状与强度特性。结果表明, 湛江黏土的剪切破坏形态主要是单一型、双交叉剪切带与“腰鼓”型 3 类, 应力-应变特性主要为轻度应变软化、强烈应变软化、轻度应变硬化、强烈应变硬化 4 类; 偏压固结下试样破坏应变小于等压固结相应值, 破坏强度及初始弹性模量比后者大; 不同应力路径下土的强度差异主要反映在结构屈服前有效黏聚力的不同, 结构屈服前, 原状土的黏聚力高于重塑土的黏聚力, 内摩擦角小于后者; 结构屈服后, 黏聚力逐渐减小, 内摩擦角略有增大。原状土到重塑土的转变过程是黏聚力与内摩擦力在土体内部相互消长的过程, 强结构性黏土在结构屈服前的强度指标具有较强应力路径依赖性。

**关 键 词:** 湛江黏土; 强结构性; 应力路径; 强度特性; 黏聚力; 结构屈服

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 7598 (2015) 增 1 - 0019 - 06

## Effect of stress path on strength properties of Zhanjiang strong structured clay

KONG Ling-wei<sup>1</sup>, ZANG Meng<sup>1</sup>, GUO Ai-guo<sup>1</sup>, TUO Yong-fei<sup>2</sup>

(1.State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Rail and Underground Engineering Branch, CCCC Second Highway Consultants Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China)

**Abstract:** To explore the strength properties of undisturbed sample and remolded sample of Zhanjiang strong structured clay under different stress paths and its relevance to the soil structure, the stress path tests of such as conventional triaxial compression(CTC), reduced triaxial compression(RTC) and conventional triaxial extension(CTE) under different consolidation conditions are carried out, the mechanical behaviors as well as the strength properties of strong structured clay are analyzed. The results show that the shear failure modes of Zhanjiang clay mainly include unitary type, double crossover shear zone and waist drum type; and the stress-strain properties mainly include mild strain softening, intense strain softening, mild strain hardening and intense strain hardening. The failure strain of all the samples under anisotropic consolidation is less than that of isotropic consolidation while the breaking strength and initial elastic modulus are larger. The strength properties of clay under different stress paths are mainly reflected in the change of effective cohesion before the structure yielded; undisturbed sample has a higher cohesion and lower frictional angle compared with the remolded sample; but after structure yielded, the cohesion decreases and the frictional angle increases gradually. The transition from undisturbed sample to remolded sample is a growth and decline process of cohesion and friction inside the microstructure of clay. Based on the results, it is pointed out that the strength indexes of strong structured clay before the structure yielding has a quite strong dependence to the stress paths.

**Keywords:** Zhanjiang clay; strong structure; stress paths; strength properties; cohesion; structure yield

## 1 引 言

结构性作为天然土的一种固有属性,总是通过自身变化隐性影响土体的工程特性,本质上增加了土力学研究的复杂性,也使得在工程实践中很难准

确获得土性的变化,应力路径对土体力学性状的影响如何精细把握也是如此。国内外学者采用三轴仪、GDS 应力路径仪、真三轴仪等,对天然土的工程特性进行了研究,深入地分析了应力路径影响下土体的变形、孔压、强度特性<sup>[1-5]</sup>。在此基础上,

收稿日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(No.51179186)

第一作者简介: 孔令伟,男,1967年生,博士,研究员,博士生导师,主要从事特殊土的力学特性与灾害防治技术研究。E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

提出了能够考虑具体复杂应力路径的本构模型<sup>[5-7]</sup>以及相应的数值建模方法<sup>[7]</sup>。迄今已从不同角度探讨了应力路径对黏性土力学特性的影响规律,但关注不同应力路径下的土体结构性效应尚不多,在岩土工程设计的参数选取中通常应用土体有效应力指标与应力路径条件无关的假设。

从理论上讲,结构性黏土在剪切过程中伴随着结构的破损,其强度衰减程度与应力路径方向有很大的关联性,深入了解结构性及应力路径影响下的土体强度演变规律具有重要意义。本文在以往湛江黏土研究工作基础上<sup>[8-12]</sup>,聚焦于该黏土在不同应力路径和应力水平下的破坏特性与强度特性,以期深化对强结构性黏土强度演化机制的认知。

## 2 试验土样与试验方案

### 2.1 试验土样

土样取自湛江市某地海岸边沉积层,埋深7.0~10.0 m,土层具有水平微薄层理,层面之间可见少量砂粒,试验制样的轴线均为原状土所在层理的法线。其物理力学性质指标平均值与颗粒组成见表1。由表可见,湛江黏土的力学性质优于一般软

土,原状土无侧限抗压强度达150 kPa,结构屈服强度高达400~600 kPa,灵敏度多为5~7,属于具有高灵敏性的强结构性黏土,是一种研究结构性土力学性状的理想材料。

### 2.2 试验方案

试验采用英国GDS应力路径三轴试验系统。土样为原状样与相应重塑样,直径为38 mm,高76 mm。对试样采取饱和分抽气真空饱和和反压饱和两步进行,使其饱和度达98%后进行试验。针对原状样与重塑样,考虑应力路径、应力条件、固结与剪切条件、排水方式等影响因素,固结过程采用等向固结(渗透系数 $K=1.0$ )与偏压固结( $K=0.7$ )两种方式,剪切过程采用主动压缩、被动压缩与主动伸长3种方式,具体方案见表2。

设定剪切破坏标准为:变形为应变软化型取应力峰值( $\sigma_1 - \sigma_3$ )为破坏强度,应变硬化型以轴向应变 $\varepsilon_1 = 15\%$ 时主应力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sub>f</sub>为破坏强度。为表示方便,表2中试验土样以US(undisturbed sample)表示原状样,DS(disturbed sample)表示重塑样,下角标数值表示固结压力终值,如US1<sub>200</sub>为第1组固结压力终值为200 kPa的主动压缩试验原状土试样。

表1 湛江黏土基本物理力学性质指标平均值与颗粒组成

Table 1 Physical and mechanical average indexes and grain size distribution of Zhanjiang clay

重度 $\gamma$ /(kN/cm <sup>3</sup> )	含水率 $w$ /%	孔隙比 $e$	液限 $W_L$ /%	塑限 $W_p$ /%	塑性 指数 $I_p$	渗透系数 $K$ /(10 <sup>-8</sup> cm/s)	无侧限抗 压强度 $q_u$ /kPa	灵敏 度 $S_t$	结构屈 服应力 $\sigma_k$ /kPa	不同颗粒(mm)组成/%			
										> 0.05	0.005 ~ 0.05	0.002 ~ 0.005	< 0.002
17.7	48.6	1.4	60.0	23.0	38.0	1.64	150	5~7	400~600	15	36	23	26

表2 应力路径试验

Table 2 Stress paths testing program

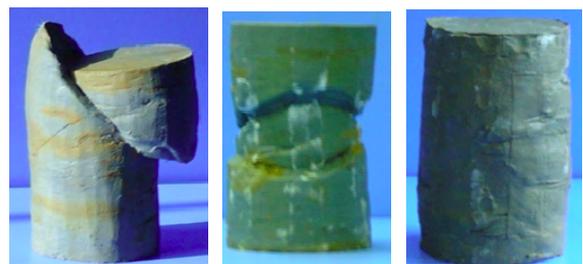
试验编号	试验类型	固结过程		剪切过程	
		固结压力终值/kPa	固结路径	剪切路径	剪切速率
第1组	主动压缩(CTC)	200、300、400、500、600、700、800	等向固结	$\sigma_1$ 增大, $\sigma_3$ 不变, 不排水	0.055
第2组	主动压缩(CTC)	200、400、600、900、1200	偏压固结	$\sigma_1$ 增大, $\sigma_3$ 不变, 不排水	0.055
第3组	被动压缩(RTC)	100、300、500、700、900	偏压固结	$\sigma_1$ 不变, $\sigma_3$ 减小, 排水	0.060
第4组	主动伸长(CTE)	100、200、300	偏压固结	$\sigma_1$ 不变, $\sigma_3$ 增大, 排水	0.060

注:第1、2组剪切速率单位为mm/min,第3、4组剪切速率单位为kPa/min。

## 3 不同应力路径湛江黏土的强度特性

### 3.1 试样破坏形态

所有试样在 $\varepsilon_1$ 达到15%之前均出现塑性破坏特征,具有剪切带痕迹,如图1所示。不同应力路径试样的破坏形态可分为三类:(1)原状土主动压缩试验主要呈现单一型剪切带,并向一侧倾斜;(2)主动拉伸试验主要为双交叉剪切带且呈“X”型;(3)重塑土或高围压固结后原状土的剪切试验均呈现



(a) 单一型剪切破坏 (b) “X”型剪切破坏 (c) “腰鼓”型破坏

图1 试样典型破坏形态照片

Fig.1 Photographs of soil sample's typical failure mode

“腰鼓”型破坏。蒋明镜根据珠海海积软土剪切带内外以及边缘微观结构定量分析认为,剪切破坏后,相对于剪切带外缘,剪切带内的微观结构变化非常明显<sup>[13]</sup>,说明土的结构对剪切破坏有不同忽视的影响,是黏土产生剪切带的必要条件。

### 3.2 应力水平对强度的影响

图 2 为湛江黏土原状土与重塑土在不同应力路径条件下的偏应力-轴向应变曲线。在主动压缩路径中,强结构性对湛江原状土的应力-应变特性影响显著,结构屈服应力  $\sigma_k > \sigma_3$ , 变形呈应变软化型;  $\sigma_k < \sigma_3$  时则其变形表现出与重塑土相同的应变硬

化型。结构性土不同的应力-应变性状可归纳为 I-轻度应变软化、II-强烈应变软化、III-轻度应变硬化、IV-强烈应变硬化 4 种类型。其中,重塑土及高固结压力下的原状土以 I 型与 III 型为常见;II 型主要产生于低固结压力下的原状土,且以侧向卸载及拉伸试验表现明显;IV 型较少见,主要是重塑土在较高固结压力下三轴压缩中出现,这是由于土的结构强度遭到破坏后,为了适应外力的变化,不断形成新的更密实稳定结构,进而获得更大的强度,这种应力-应变关系是颗粒间滑移所致,即表现出重塑土典型的压硬性。

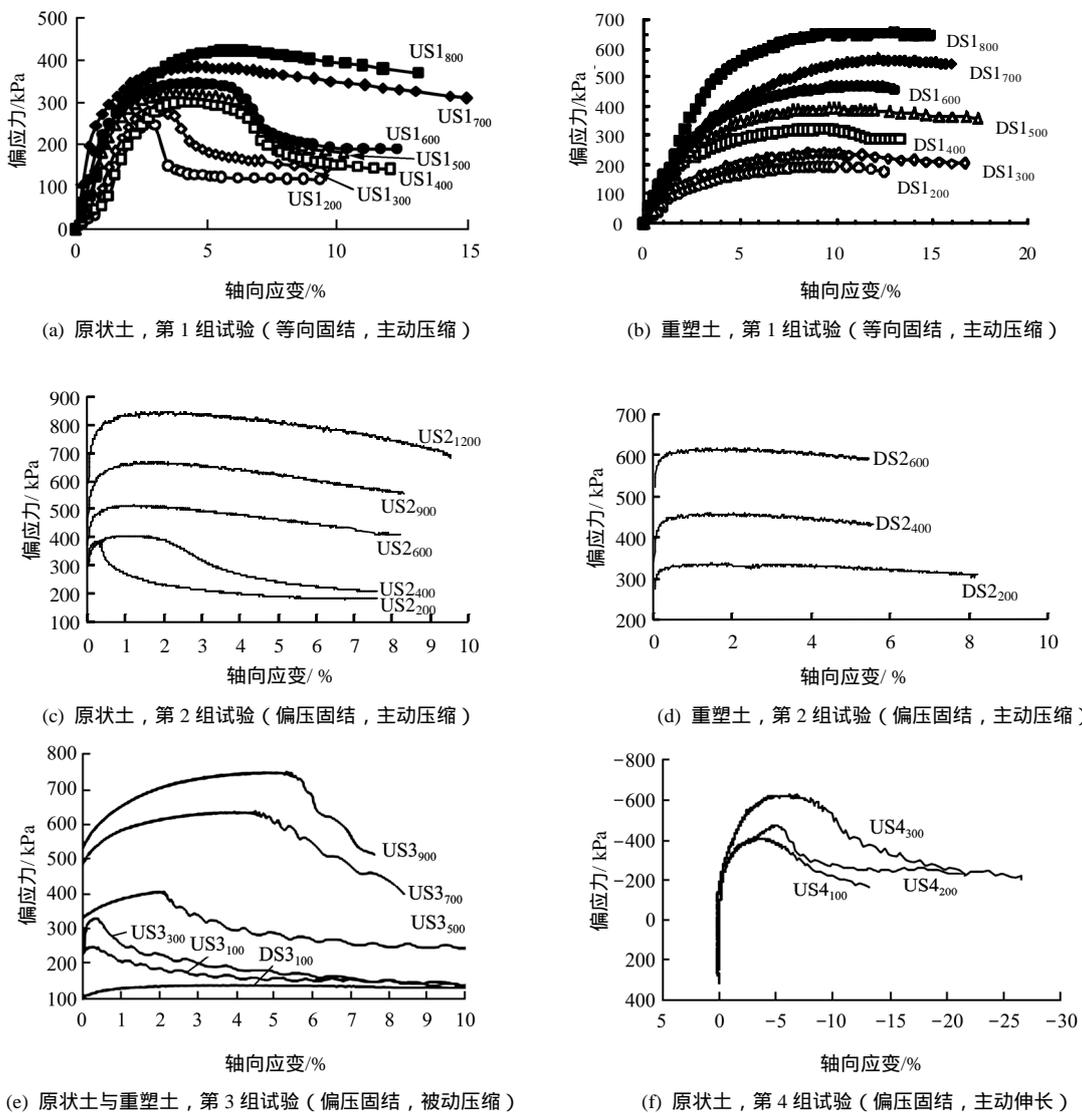


图 2 湛江黏土不同应力路径的偏应力-轴向应变曲线

Fig.2 Deviator stress and axial strain curves of Zhanjiang clay in various stress paths

由于结构性的影响,原状土的抗剪强度在结构屈服应力前后有显著差异,表 3 为根据 4 组试验得到的不同应力路径下强度参数指标,图 3 为典型强度包线。对比原状土在结构屈服前后的强度参数变

化发现,结构屈服前的黏聚力均明显高于重塑土,而内摩擦角则相反,表明随着湛江黏土结构强度的丧失,原状土到重塑土的转变过程是黏聚力与摩擦力在土体内部的相互消长过程,即原状土的黏聚力

丧失与摩擦力增强的代偿过程。

### 3.3 固结条件对强度指标的影响

基于第1组与第2组的试验结果，探讨等压固结与偏压固结条件对结构性黏土强度的影响。由表3和图3(a)~3(d)可知，在一定固结条件下原状土在结构屈服前的黏聚力明显高于重塑土，而结构屈服后的原状土不排水强度峰值却低于相应固结压力下的重塑土，其内在机制在于应力水平超过结构屈服应力时土体结构性影响逐渐消失。考虑到天然黏土在结构屈服后阶段会受到残余结构性影响所产生的抵抗力，其强度线理应处于重塑土的强度线之上。但从表3发现，重塑土没有结构性的影响，仍表现出较高的强度指标，如第2组试验得到重塑土的黏

聚力  $c$  高达 69 kPa，出现较高的强度指标是由固结效应所致。原状土持有的结构强度不利于固结压缩，而重塑土的高压缩性导致其在相同固结条件的体变相对较大。在相同固结条件下，原状土与重塑土在强度上的差异是由固结压密作用而致，也从原状土与重塑土在不同固结条件下的体积变形及对应剪切破坏强度规律可以得到印证。图4、5分别为主动压缩路径下固结压力与体积应变及剪切强度关系曲线。相对于等压固结条件，偏压固结条件下试样固结时排水较多，固结效应明显，破坏时的剪应力较高；相同固结条件下，原状土的结构性对固结作用有一定影响，固结体变小于重塑土，导致破坏时的剪应力略小。

表3 湛江黏土不同应力路径下抗剪强度指标  
Table 3 Shear strength parameters of Zhanjiang clay in various stress paths

试验编号	土样	总应力强度指标				有效应力强度指标			
		结构屈服前		结构屈服后		结构屈服前		结构屈服后	
		$c_1/\text{kPa}$	$\varphi_1/(\text{°})$	$c_2/\text{kPa}$	$\varphi_2/(\text{°})$	$c'_1/\text{kPa}$	$\varphi'_1/(\text{°})$	$c'_2/\text{kPa}$	$\varphi'_2/(\text{°})$
第1组	原状土	92	6	37	10	98	9	41	15
	重塑土	10	16	10	16	28	20	28	20
第2组	原状土	170	3	65	13	170	3	11	16
	重塑土	69	15	69	15	75	16	75	16
第3组	原状土					89	9	0	17
第4组	原状土					121	15	121	15

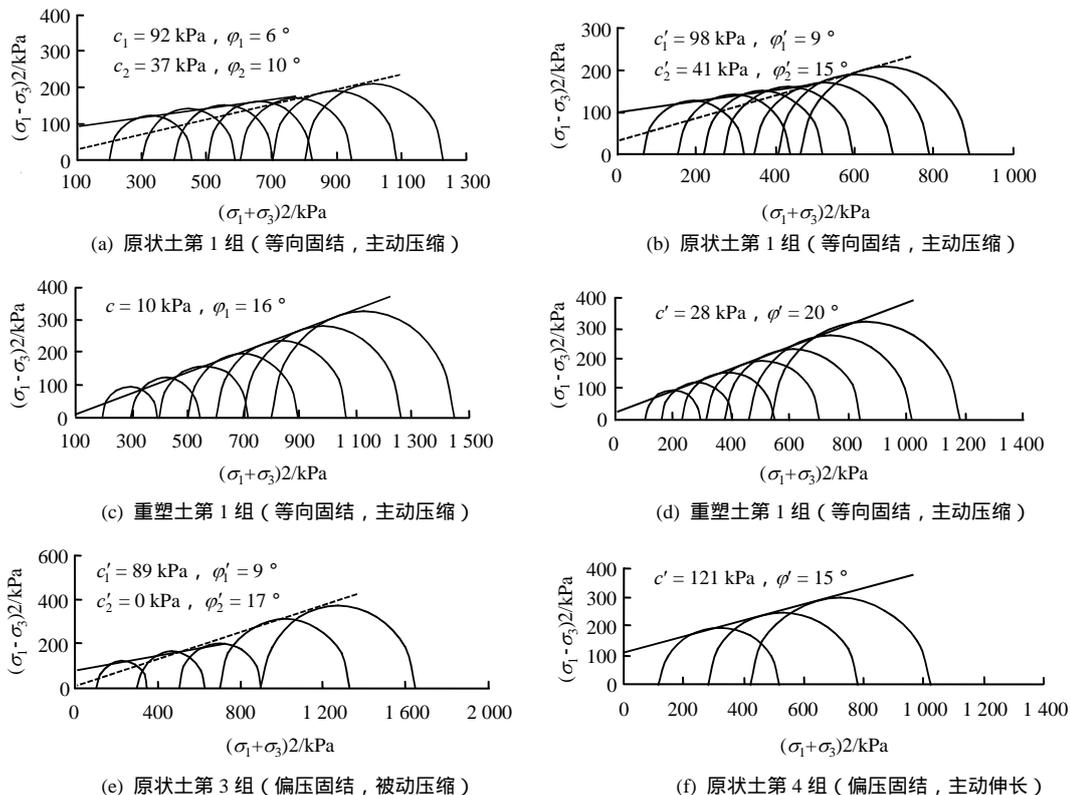


图3 湛江黏土典型应力路径的强度包线曲线  
Fig.3 Strength envelope curves of Zhanjiang soft clay in various stress paths

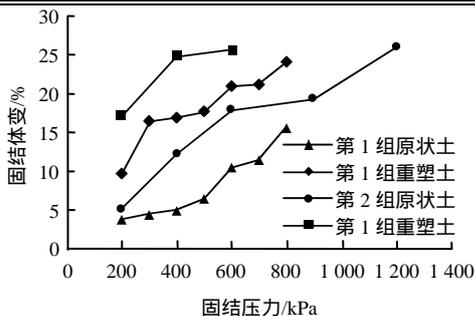


图 4 主动压缩路径下固结压力-体积应变关系  
Fig.4 Consolidation pressure vs. volumetric strain relations in active compression paths

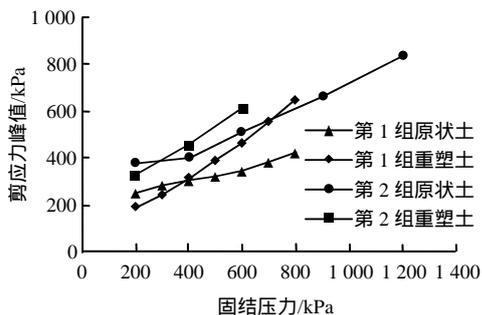


图 5 主动压缩路径下固结压力-抗剪强度关系  
Fig.5 Consolidation pressure vs. shear strength relations in active compression paths

从图 2(a)~2(d)可以看出,湛江黏土在相同围压固结后剪切,不同固结条件下破坏强度相差很大,偏压固结时试样破坏应变均小于等压固结相应值,而破坏强度及初始弹性模量则相反。由于偏压固结下试样已承受较大偏应力,即使对比等  $P$  固结(等压固结与偏压固结的球应力相等)下试样的强度特性,偏压固结条件下的剪切破坏强度仍然相对较高。产生这种现象的原因在于初始应力状态对土体剪切有较大影响,不同初始应力诱导作用改变了土体在剪切中的结构再造规律,宏观上表现为强度指标的差异;另一方面,两种固结方式导致其固结体变的差异也是影响其强度指标不同的重要因素(见图 4、5),如原状土在同一剪切应力下固结后的剪切应变值明显大于偏压固结相应值(图 2(a)、2(b)与图 2(c)、2(d)),重塑土在不同固结条件下的强度参数黏聚力变化幅度也较大(见表 3)。因此可以认为,受结构性的制约,原状土在结构屈服前固结体变很小,固结方式对排水体积的影响程度远小于重塑土,这在一定程度上反映出结构性黏土的应力路径依赖性与初始固结状态具有较大关联性。

### 3.4 剪切条件对强度的影响

从原状土在偏压固结条件下的主动压缩、被动

压缩和主动伸长等 3 种不同应力路径的剪切强度指标看(见表 3),相同固结条件下不同应力路径的试验土样具有不同的强度值,尤其是有效黏聚力  $c'$  的差异性最为显著,其中,试样在低固结压力下,轴向加载条件下的黏聚力  $c'$  明显高于卸荷路径;随着固结压力的增大,因土体结构性的破损,导致二者的  $c'$  值急剧降低,内摩擦角  $\varphi'$  有所提高,说明对于结构性黏土而言,加载与卸荷路径的强度差异主要反映在结构屈服前土的  $c'$  的不同,而主动伸长的  $c'$  值高于被动压缩而低于主动压缩。因此,对于湛江黏土,在相同固结条件下的天然土体在结构屈服前的强度指标具有较强应力路径依赖性。

值得说明的是,自 1967 年 Lambe 提出应力路径概念以来,针对这一命题的学术争论就从未停止,但有效应力强度指标与应力路线无关的假设已在土力学界被普遍接受<sup>[14]</sup>。塑性力学理论认为,对于均匀的各向同性材料,其抗剪强度指标与应力路径无关,但土体是具有复杂结构的碎散性材料,岩土界关注较多的是不同应力路径下应力诱导各向异性对土体工程特性的影响,将应力路径引起的强度差异归结为土体的各向异性所致<sup>[15]</sup>,但土体所表现出来的各种变形及强度特性归根结底是其内部结构要素调整和演化的综合反映,作为内部微观结构的一种宏观量度,黏聚力与内摩擦角在土体强度演化的不同阶段反映出不同的内涵,应该说对应力路径的依赖性与土体结构性是否存在密切的关联性研究迄今尚不够充分,尤其对于强结构性黏土是否也具体普适性,值得进一步探讨。

## 4 结 论

(1) 湛江黏土的剪切破坏形态主要有单一型剪切带、双交叉剪切带、“腰鼓”型,应力-应变特性表现为轻度应变软化、强烈应变软化、轻度应变硬化、强烈应变硬化 4 种类型。

(2) 受强结构性影响,应力条件、固结状态、剪切条件都对湛江黏土的强度影响显著。当  $\sigma_3 < \sigma_k$  时,原状土黏聚力高于重塑土,内摩擦角则相反。随着结构的破损,黏聚力逐渐减小,内摩擦角增大。偏压固结下试样破坏应变小于等压固结相应值,而破坏强度及初始弹性模量则比后者大。不同剪切路径条件下,湛江黏土的强度差异主要反映在结构屈服前有效黏聚力  $c'$  的不同。

(3) 强结构性黏土在结构屈服前的强度指标具有较强应力路径依赖性,随着湛江黏土结构强度的

丧失,原状土到重塑土的转变过程是黏聚力与摩擦力在土体内部相互消长的过程;应力路径的依赖性与土体结构性是否存在密切关联性值得深入探讨。

### 参 考 文 献

- [1] CALLISTO L, RAMPELLO S. Shear strength and small-strain stiffness of a natural clay under general stress conditions[J]. *Geotechnique*, 2002, 52(8): 547 - 560.
- [2] MALANRAKI V, TOLL D G. Triaxial tests on weakly bonded soil with changes in stress path[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2001, 127(3): 282 - 291.
- [3] 刘恩龙, 沈珠江. 不同应力路径下结构性土的力学特性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 2058 - 2054. LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Mechanical behavior of structured soils under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 2058 - 2054.
- [4] 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 Ling-ling, CHEN Xiao-ping. Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(5): 1264 - 1270.
- [5] NAKAI T, HINOKIO M. A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters[J]. *Soils and Foundations*, 2004, 44(2): 53 - 70.
- [6] 路德春, 姚仰平. 黏土的应力路径本构模型[J]. *岩土力学*, 2007, 28(4): 649 - 654. LU De-chun, YAO Yang-ping. Constitutive model for clay considering complex stress paths[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(4): 649 - 654.
- [7] 罗汀, 高智伟, 万征, 等. 土剪胀性的应力路径相关规律及其模拟[J]. *力学学报*, 2010, 42(1): 93 - 101. LUO Ding, GAO Zhi-wei, WAN Zheng, et al. Influence of the stress path on dilatancy of soils and its modeling[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(1): 93 - 101.
- [8] 拓勇飞, 孔令伟, 郭爱国, 等. 湛江地区结构性软土的赋存规律及其工程特性[J]. *岩土力学*, 2004, 25(12): 1879 - 1884. TUO Yong-fei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Occurrence and engineering properties of structural soft clay in Zhanjiang area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(12): 1879 - 1884.
- [9] 蔡羽, 孔令伟, 郭爱国, 等. 剪应变率对湛江强结构性黏土力学性状的影响[J]. *岩土力学*, 2006, 27(8): 1235 - 1240. CAI Yu, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Effects of shear strain rate on mechanical behavior of Zhanjiang strong structured clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(8): 1235 - 1240.
- [10] 孔令伟, 张先伟, 郭爱国, 等. 湛江强结构性黏土的三轴排水蠕变特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(2): 365 - 372. KONG Ling-wei, ZHANG Xian-wei, GUO Ai-guo, et al. Creep behavior of Zhanjiang strong structured clay by drained triaxial test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(2): 365 - 372.
- [11] 孔令伟, 何利军, 张先伟. 湛江黏土的蠕变模型与变参数塑性元件[J]. *岩土力学*, 2012, 33(8): 2241 - 2246. KONG Ling-wei, HE Li-jun, ZHANG Xian-wei. Creep model of Zhanjiang clay and plastic components with variable parameters[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(8): 2241 - 2246.
- [12] ZHANG X W, KONG L W, LI J. An investigation of alterations in Zhanjiang clay properties due to atmospheric oxidation[J]. *Géotechnique*, 2014, 64(12): 1003 - 1009.
- [13] 蒋明镜, 彭立才, 朱合华, 等. 珠海海积软土剪切带微观结构试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(7): 2017 - 2024. JIANG Ming-jing, PENG Li-cai, ZHU He-hua, et al. Microscopic investigation on shear band of marine clay in Zhuhai, China[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2017 - 2024.
- [14] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [15] 张坤勇, 殷宗泽, 梅国雄. 土体两种各向异性的区别与联系[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(9): 1599 - 1604. ZHANG Kun-yong, YIN Zong-zhe, MEI Guo-xiong. Difference and connection of two kinds of anisotropy of soils[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(9): 1599 - 1604.