

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201803024

侧向卸荷条件下结构性软黏土典型力学特性

贾敏才^{1,2}, 赵 舜¹, 张 震¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092)

摘 要: 为研究海积结构性软黏土在侧向卸荷路径下的结构损伤特性, 通过温州瑞安软黏土侧向卸荷条件下的应力路径试验, 研究侧向卸荷路径和结构性对软黏土应力-应变关系、强度、初始卸荷模量等典型力学特性的影响; 分析应力路径和土样深度对初始结构性及损伤特性的影响。试验结果表明: 温州软黏土应力-应变关系呈明显应变软化型, 具有较强的结构性; 侧向卸荷条件下, 初始切线模量与平均固结压力呈线性关系, 斜率为加荷条件的1.4倍; 侧向卸荷条件下达到峰值强度时对应的应变较常规加荷条件小。拓展了应力比结构性参数的应用范围, 计算结果表明侧向卸荷条件下初始应力比结构性参数明显大于常规加荷条件。结构损伤曲线可分为平稳损伤、加速损伤和减速损伤三段, 常规加荷条件下加速损伤段的损伤速率明显大于卸荷条件, 这种差异与其各向异性有关, 施工时需予以重点关注。

关键词: 侧向卸荷; 软黏土; 应力-应变关系; 结构性参数; 损伤特性

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)12-0133-08

Typical mechanical characteristics of structural soft clay under lateral unloading condition

JIA Mincai^{1,2}, ZHAO Shun¹, ZHANG Zhen¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Lab of Geotechnical and Underground Engineering (Tongji University), Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

Abstract: To study the structural damage characteristics of marine soft clay under lateral unloading path, stress path tests under lateral unloading condition on the clay obtained from Ruian, Wenzhou were carried out to study the influence of lateral unloading path and structure on stress-strain relationship, shear strength, initial tangent modulus, and other typical mechanical properties. The influences of stress path and soil depth on initial structure and characteristics of structural damage were analyzed. The experimental results show that the structure of Wenzhou soft clay is strong and its stress-strain relation is obviously strain-softening. Under lateral unloading condition, the initial tangent modulus is linearly related to the average consolidation pressure, and the slope is 1.4 times that of the loading condition. The corresponding strain at peak strength of shear stress is smaller than that under loading conditions. The stress ratio structural parameters of soft clay under lateral unloading condition were presented. The results show initial stress ratio structural parameters under lateral unloading condition is obviously larger than those under loading condition. The structural damage curves can be divided into three sections: smooth damage, accelerated damage and deceleration damage. The structural damage rate under loading condition in accelerated damage section is faster than that under lateral unloading condition. The difference of structural damage rate which needs more attention is related to the anisotropy of soft clay.

Keywords: lateral unloading; soft clay; stress-strain relationship; structural parameters; characteristics of structural damage

土的结构性是土体在形成过程中受沉积环境、土颗粒本身性质以及天然地质应力等因素影响而形成的一种特性^[1]。实际工程中土体的受力情况复杂多变, 土体结构性的存在导致其表现出截然不同的力学和工程特性。

沈珠江^[2]率先采用指数型函数来描述结构性

损伤规律, 并指出常规三轴条件下损伤参数为定值; Rouainia 等^[3]、Suebsuk 等^[4]分别基于试验结果和经验值计算了结构性损伤参数; 谢定义等^[5]、陈存礼等^[6-7]、Rowe 等^[8]多位学者分别基于综合结构势理论建立了应力结构性参数、应变结构性参数和孔隙比结构性参数。这些参数适应性较好, 试验和计算方便, 但受试验条件影响相对较大, 难以考虑剪切作用对土体结构性的影响; 不同应力路径下结构性对土体力学特性影响的差异性也难以刻画。为同时考虑球应力和偏应力共同作用的影响, 邓国华等^[9-11]基

收稿日期: 2018-03-03

基金项目: 浙江省交通运输厅科研计划项目(2014H06)

作者简介: 贾敏才(1973—), 男, 副教授, 博士生导师

通信作者: 贾敏才, mincai_jia@tongji.edu.cn

于黄土在常规条件下的真三轴试验进一步提出了应力比结构性参数,分析了结构性与固结状态对强度和变形的影响.熊春发等^[12]进一步将应力比结构性参数应用于饱和软黏土,研究了加荷模式对结构损伤特性的影响.

综上所述,目前的结构性参数通常基于非饱和黄土在常规加荷条件下的实验结果推导得出;针对海积结构性软黏土在其他特定应力路径下的结构损伤研究尚不多见.如宰金珉等^[13],周秋娟等^[14-15]分别选取南京河西地区和珠三角洲相沉积的饱和黏性土对比了其在加、卸荷条件下变形、强度、蠕变等典型力学特性方面的差异,但尚未考虑土体结构性和应力路径对土体典型力学特性的影响.因此,基于海积结构性软黏土的复杂性,探究其在侧向卸荷路径下的典型力学特性,并就结构损伤特征与应力路径的关联规律进行研究仍有很大的空间和应用价值.

以温州瑞安地区的典型软黏土为例,通过侧向卸荷条件下的三轴剪切试验,分析了结构性软黏土应力-应变关系、强度和初始切线模量特性;同时,选择合适的结构性参数探究了应力路径和土样深度与土体结构性及损伤之间的规律,以期软黏土地区的卸荷工程提供参考.

1 试验概况

1.1 试验土样

本次试验的研究对象为广泛分布在温州瑞安地区的淤泥质海积黏土,取土深度为 5~17 m;灵敏度

$S_l>4$,属于高灵敏度土,具有强结构性.为尽量避免土样的扰动影响,采用直径为 100 mm,长度为 500 mm的薄壁取土器进行取样.取样过程保证无震冲静压取,试样取回后放入养护室备用.

土样粒径分布为:细粒含量(粒径小于 0.075 mm)占 99%,其中黏粒含量(粒径小于 0.005 mm)占 60%,属高液限黏土.土样的其他物理力学性质指标见表 1.

试样制备按 SL 237—1999《土工试验规程》要求进行.其中,饱和采用真空泵抽气和反压饱和两种方法,本文试验的孔压系数 B 值均可达到 0.98 以上.室内采用击实法,依据干密度和含水量标准制备重塑土样.

1.2 试验方案

本试验采用 GDS 应力路径三轴仪进行固结不排水剪切试验,试验方案见表 2.刘用海^[16]试验研究表明,结构性较强的黏土其应力-应变曲线对围压变化敏感,故为了保护土体的结构性,恢复土样原始应力状态,固结围压应尽可能接近但不超过其先期固结压力.结构性软黏土的先期固结压力采用王国欣等^[17]提出的还原压缩曲线的数学模型确定.

试验土样采用 K_0 固结,固结过程采用间接控制法,通过记录排水量来测算试样截面面积,然后反馈调节轴向变形,从而保证径向变形为零,实现土体的 K_0 固结.硬化型土样取广义剪应变 $\varepsilon_a=15\%$ 时所对应的应力值作为破坏强度;软化型土样取偏应力峰值点作为破坏强度.

表 1 软土土样的物理力学性质指标

Tab. 1 Physical and mechanical properties of soft soil sample

含水量 $w/\%$	土粒相对密度	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^3)$	孔隙比 e_0	塑限 $w_p/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限指数 I_p	液限指数 I_L	压缩指数 C_c
74.1	2.72	1.56	2.07	28.4	55.5	27.1	1.68	0.53

表 2 三轴不排水剪切试验方案

Tab. 2 Scheme of undrained triaxial shear tests

组号	试验方法	试验编号	K_0 固结		剪切过程(不排水)		
			σ_3/kPa	σ_1/kPa	控制方式	剪切路径	剪切速率
A	RTC	RTC ₃₀	30	30/ K_0	应力控制	σ_1 不变, σ_3 减小	$v=0.1\text{ kPa/min}$
		RTC ₅₀	50	50/ K_0			
		RTC ₇₀	70	70/ K_0			
		RTC ₉₀	90	90/ K_0			
B	CTC	CTC ₃₀	30	30/ K_0	应力控制	σ_1 增大, σ_3 不变	$v=0.1\text{ kPa/min}$
		CTC ₅₀	50	50/ K_0			
		CTC ₇₀	70	70/ K_0			
		CTC ₉₀	90	90/ K_0			
C	RTC _{CS}	RTC _{CS30}	30	30/ K_0	应力控制	σ_1 不变, σ_3 减小	$v=0.1\text{ kPa/min}$
		RTC _{CS50}	50	50/ K_0			
		RTC _{CS70}	70	70/ K_0			
		RTC _{CS90}	90	90/ K_0			

注: CTC 表示原状土的加荷试验,RTC 和 RTC_{CS} 分别表示原状土和重塑土的侧向卸荷试验.试样编号下标表示围压,单位为 kPa.

试验分 3 组进行,A 组采用逐步降低侧向荷载、保持轴向荷载不变的固结不排水剪切试验(RTC),模拟开挖过程中基坑侧面土体的应力路径;B 组采用侧向荷载不变、轴向加荷的对比试验(CTC);C 组为重塑土侧向卸荷的对比试验(RTCcs).为保证试验结果的可比性,试验过程采用一致的固结条件和剪切速率.

2 结果及分析

2.1 应力-应变规律

图 1 为不同固结压力水平下,CTC、RTC 和 RTC_{CS}三种试验条件的应力-应变关系曲线.表 3 为三组试验应力-应变曲线特征对比.

通过试验研究,可发现如下规律:

1) 卸荷条件下结构性被破坏的重塑土其应力-应变曲线形态呈双曲线型,即应变硬化型;其初始切线模量明显小于原状土,表明结构性对于变形具有延迟作用;原状土达到峰值强度后随着应变继续发展土体结构性趋于完全破坏,其强度与重塑土趋于一致.如表 3 对 $q_{e-15\%}$ 的对比所示,重塑土的极限强度值与原状土的残余强度趋向同一值.这一规律与陈铁林等^[18]对结构性软黏土在加荷条件下的研究成果一致.

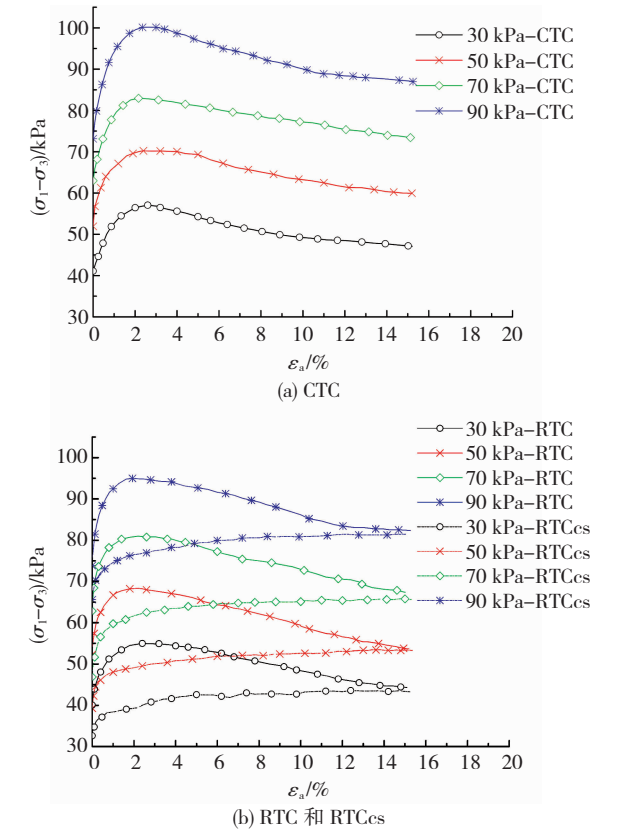


图 1 两种应力路径下的应力-应变曲线
Fig.1 Stress-strain curves under different stress path conditions

表 3 三组试验应力-应变曲线特征对比
Tab.3 Comparison of stress-strain curves

固结围压/kPa	峰值强度对应应变 $\varepsilon_{q-\max}/\%$		广义剪应力峰值强度 $q_{\max}/\text{kPa}$		15% 应变对应强度 $q_{e-15\%}/\text{kPa}$	
	CTC	RTC	CTC	RTC	RTC	RTC _{CS}
30	2.825	2.423	57.056	54.987	44.301	43.264
50	2.599	2.199	70.647	68.336	53.653	53.328
70	2.457	2.200	82.944	80.987	67.367	65.618
90	2.497	2.063	100.350	95.012	82.354	81.459
对比指标	AVG($\Delta\varepsilon_{q-\max}$) = 0.373%		AVG($\Delta q_{\max}$) = 2.920 kPa		AVG($\Delta q_{e-15\%}$) = 1.001 kPa	

2) 不同深度的温州原状软黏土在相应的固结压力下试样的曲线形态相似,均表现出较强的结构性,呈应变软化型.加工软化材料的应力变化矢量均指向屈服面内部,其加卸载须在应变空间判断.根据其加卸载准则,CTC 和 RTC 试验均满足应变空间的 $d\varepsilon > 0$,所以,侧向卸荷和轴向加荷均属于 $p-q$ 空间的加载条件,两者土样的应力-应变规律和剪切性状在本质上是相同的.

另一方面,由于本文中土样的围压根据土样取土深度确定,因此随着固结围压的提高,不会出现土样结构性消失,曲线趋于硬化的现象;图 2 中的总应力强度包络线为直线,而非折线也是基于此原因.

3) 在相同固结压力下,常规加荷条件下原状土

应力-应变曲线对应的广义剪应力峰值强度较卸荷条件增大 2~5 kPa.这是由于侧向卸荷时除形成与加荷时相当的广义剪应力 Δq 外,还会因降低土体的球应力 Δp 从而造成附加变形,使得土样的广义剪应力峰值降低.

2.2 强度特性

图 2 为 CTC 和 RTC 试验的总应力强度包络线,表 4 为加、卸荷条件下总应力强度指标和有效应力强度指标.

侧向卸荷条件下,比较原状土与重塑土的总应力抗剪强度指标(表 4)可知,重塑土的黏聚力几乎消失,但内摩擦角变化很小.这表明结构性土的结构强度被破坏后,土体的联结强度基本消失,但结构性

对土体土颗粒的表面摩擦力,颗粒间的嵌入和联锁作用产生的咬合力影响不大。

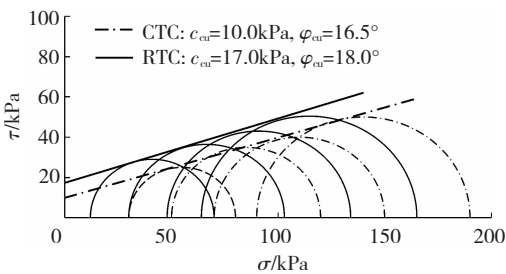


图 2 两种剪切条件下总应力强度包络线比较

Fig. 2 Comparison of strength envelopes under different shear conditions

表 4 两种不同应力路径下的强度指标

Tab. 4 Strength parameters under different stress path conditions

强度指标	总应力		有效应力	
	c_{cu}/kPa	$\varphi_{cu}/(^{\circ})$	c'/kPa	$\varphi'/(^{\circ})$
CTC	10.0	16.5	13.5	19.7
RTC	17.0	18.0	14.9	15.4
RTC _{CS}	1.2	18.6	—	—

注:RTC_{CS}试验过程中孔隙水压力始终不稳定,因此未计算有效应力强度指标。

对比加、卸荷条件下的强度指标发现,温州软黏土的总应力强度指标和有效应力强度指标均与应力路径有关;卸荷条件下原状土的总应力强度指标明显大于加荷条件,而有效应力强度指标则相反。如图 3 所示,卸荷条件下土体发生侧向膨胀的同时内部产生负孔隙水压力,使得有效应力圆右移,有效应力强度指标降低;而常规加荷时土体内部产生较大的正孔隙水压力,故有效应力强度指标明显提高。

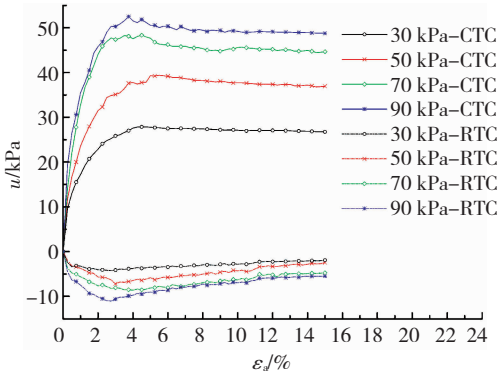


图 3 两种剪切条件下土样的孔隙水压力

Fig. 3 Pore pressure of soft soil under different shear conditions

图 4 所示的 $p'-q$ 平面内的临界状态线进一步表明了侧向卸荷对土体有效应力强度指标的影响。虽然传统临界状态土力学观点认为,土体的有效应力强度指标与应力路径无关。但是由于室内试验技术限制和温州软黏土较强的结构性导致土样存在各向异性,试验土样在不同应力路径下的有效应力强度指标通常也存在明显差异。周秋娟等^[14]、黄质宏

等^[19]等分别通过广州南沙黏土和贵州红黏土应力路径试验也得到过类似结论。

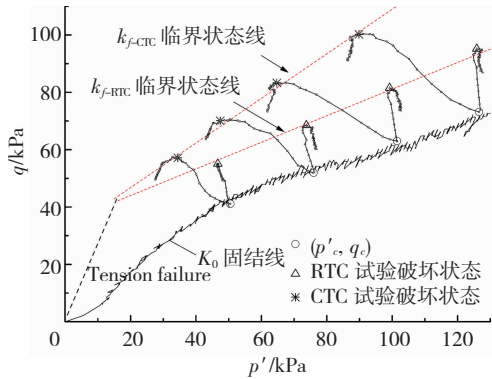


图 4 两种剪切条件下土样的临界状态线

Fig. 4 Critical state lines of soft soil under different shear conditions

2.3 初始切线模量特性

为消除围压、应力路径等对应力 - 应变关系的影响,采用平均固结压力 σ_m ($\sigma_m = (\sigma_{1c} + 2\sigma_{3c})/3$) 作为归一化因子对应力 - 应变曲线做归一处理。同时,消除初始剪应力 $\sigma_{1c} - \sigma_{3c}$ 的影响后,借鉴 Vaid^[20]提出的双曲线模型,取最大剪应力出现前的应力应变数据进行拟合。拟合公式为

$$\frac{\varepsilon \sigma_m}{(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_{1c} - \sigma_{3c})} = a + b\varepsilon, \quad (1)$$

则加荷/卸荷初始切线模量的计算公式为

$$E_{il}(E_{iu}) = \frac{\sigma_m}{a}, \quad (2)$$

式中 E_{il} 、 E_{iu} 分别为加荷/卸荷初始切线模量。

利用式(2)分别计算 CTC 和 RTC 试验的初始切线模量,得到初始切线模量与平均固结压力的关系曲线,见图 5。为比较平均固结压力作为归一化因子的效果,利用侧向固结压力作为归一化因子计算加荷/卸荷初始切线模量,见表 5。

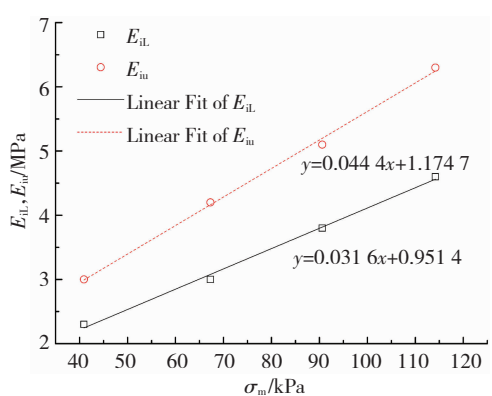


图 5 初始切线模量与平均固结压力关系曲线

Fig. 5 Curves of initial tangent modulus versus average consolidation pressure

通过图 5 计算结果可知,不论卸荷还是加荷条件下,随着平均固结应力水平的增加,土体初始切线

模量(初始点斜率)均明显增大,近似呈线性关系,与 Duncan^[21]、刘国彬等^[22]对于非结构性软黏土在侧向卸荷条件下的研究结果一致. 比较两条直线斜率可知,平均固结压力相同时,侧向卸荷条件下的初始切线模量随平均固结压力的增加,其增量较轴向加荷条件下更大,约为后者的 1.4 倍. 但在相同侧向固结压力下,如表 5 所示,两者之比会在 1.2 ~ 1.5 倍波动,离散型较强,具有一定的不确定性.

表 5 初始切线模量与侧向固结压力的关系
Tab. 5 Relationship between initial tangent modulus and lateral consolidation pressure

应力路径	侧向固结压力 σ_3 /kPa			
	30	50	70	90
侧向卸荷 E_{iu} /MPa	3.10	4.30	5.10	6.30
轴向加荷 E_{il} /MPa	2.40	2.90	3.80	4.70
E_{iu}/E_{il}	1.25	1.48	1.42	1.34

如图 4 所示, K_0 固结线并非 $p' - q$ 平面内的直线,即随土样深度的增加,侧向固结系数 K_0 并非常数. 而平均固结压力通过侧向固结系数 K_0 同时考虑了上覆土压力和侧向土压力的影响,使得初始切线模量增量更稳定,表明将平均固结压力作为归一化因子计算结构性软土在侧向卸荷条件下的初始切线模量更为合理.

2.4 讨论

实际卸荷工程中一般采用常规三轴试验的总应力强度指标对工程进行设计. 从强度控制的角度分析,如表 4 所示,常规加荷条件下总应力强度指标中的黏聚力和内摩擦角分别较侧向卸荷条件降低了 41% 和 8%,偏于安全,在一定程度上说明了各类卸荷工程中采用常规三轴试验结果进行设计的可行性,同时也表明设计过于保守易产生较大的浪费.

当卸荷工程周围环境相对复杂时,其工程的安全性可能转由变形控制. 从变形控制的角度分析,如图 1 和表 3 对峰值强度对应应变对比所示,CTC 试验和 RTC 试验原状土样的剪应力峰值强度分别在轴向应变达到 2.4% ~ 2.8% 和 2.0% ~ 2.4% 时发生. 这是由于相同固结压力下,RTC 试验的峰值剪应力强度小于 CTC 试验,其初始切线模量又大于 CTC 试验造成的. 对于结构性较强的应变软化型土而言,这导致侧向卸荷条件下土体在轴向应变较小时就容易发生破坏. 当采用常规加荷试验的结果对卸荷工程的变形情况进行控制时,容易得到过于乐观的估计情况,即使目前的变形情况尚未达到 CTC 试验土体的剪应力峰值强度,但仍可能已超过侧向卸荷条件下土体的剪应力峰值强度,需提前采取支护或加固措施,避免土体发生应变软化造成工程事故.

3 结构性及损伤特性分析

3.1 侧向卸荷条件下的结构性参数

本文应用邓国华等^[9]基于常规三轴试验结果和综合结构势理论提出的广义球 - 剪应力比结构性参数 m . 当原状土样接近饱和时,应力比结构性参数定义为

$$m = \frac{\eta_i}{\eta_{cs}}, \tag{3}$$

式中: m 为应力比结构性参数, η_i 、 η_{cs} 分别为原状土和重塑土在同一轴向应变下的应力比,应力比 $\eta = q/p'$, q 、 p' 分别为广义剪应力和有效球应力.

基于图 1 所示原状软黏土和饱和重塑软黏土在侧向卸荷条件下的试验结果,结合式(3)可得不同深度软黏土的应力比结构性参数变化规律,绘制 $m - \varepsilon_a$ (应力比结构性参数 - 轴应变)曲线见图 6.

随轴应变变化,图 6 中的结构性参数曲线可明显分为两段:当 $\varepsilon_a < 2\%$ 时,土体颗粒间原有的联结结构势和摩擦结构势均基本未被破坏,随着广义剪应力的增大,土体结构性发挥作用,曲线呈上升段;随广义剪应力逐渐变大,当 $\varepsilon_a > 2\%$ 时曲线呈下降段,土体进入原生结构逐渐破损的塑性阶段,结构联结被逐渐破坏,直至达到破坏标准 ($\varepsilon'_a = 15\%$) 时,土体空间结构性几乎完全丧失,此时应变比结构性参数 m 趋近于 1.

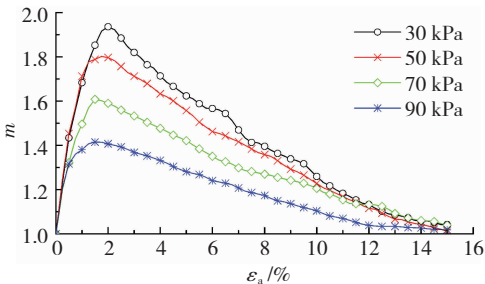


图 6 不同固结围压下的 $m - \varepsilon_a$ 曲线

Fig. 6 $m - \varepsilon_a$ curves under different consolidation pressure

上升段曲线由于广义剪应力较小,使得土体结构强度并未完全发挥,致结构性参数较小,难以反映土体真实的结构性大小;故取下降段曲线的起点 ($\varepsilon'_a, m_{\varepsilon'_a}$) 作为反映损伤结构损伤开始时的门槛应变和土体初始结构性大小. 本文土样的门槛应变 $\varepsilon'_a \approx 2\%$, 初始结构性参数见表 6.

3.2 应力路径对土体结构性的影响

从式(3)的定义来看,应力比结构性参数的力学意义是土样在剪切过程中,发生同一应变时,单位球应力所承担的剪应力之比. 常规加荷 (CTC) 和侧向卸荷 (RTC) 分别为典型的增 p 路径和减 p 路径,为明确应力路径对结构性参数的影响,可分离式

(3) 中的有效球应力 p' , 采用广义剪应力 q , 初始固结围压 σ'_1 或初始固结围压 σ'_3 进行描述:

$$m = \frac{q_i}{q_{cs}} \cdot \frac{p'_{cs}}{p'_i} = \frac{q_i}{q_{cs}} \cdot \frac{(q + 3\sigma'_3)_{cs}}{(q + 3\sigma'_3)_i} =$$
$$\frac{q_i}{q_{cs}} \cdot \frac{(3\sigma'_1 - 2q)_{cs}}{(3\sigma'_1 - 2q)_i} \quad (4)$$

式(4)中[1]为传统的应力结构性参数;在 CTC 试验中, 保持 σ'_3 不变, 同一应变下 $q_{cs} < q_i$, 故[2] 中 $(q + 3\sigma'_3)_{cs} < (q + 3\sigma'_3)_i$, 此时常规加荷条件下应力比结构性参数较应力结构性参数小;而 RTC 试验中, 保持 σ'_1 不变, 同一应变下 $q_{cs} < q_i$, 故[3] 中 $(3\sigma'_1 - 2q)_{cs} > (3\sigma'_1 - 2q)_i$, 侧向卸荷条件下应力比结构性参数较应力结构性参数大. 即对同一土样而言, 侧向卸荷条件下的应力比结构性参数较轴向加荷条件下更大.

表 6 为温州软黏土在不同应力路径下的应力比结构性参数对比. 其中, 常规加荷条件下结构性参数所用到的重塑样应力-应变曲线采用 Duncan^[21] 双曲线模型模拟, 初始切线模量参考文献[23-24] 对温州淤泥质黏土的试验确定, 极限强度值由本文原状样 CTC 试验的残余强度和 RTC 试验的破坏比共同确定.

表 6 初始应力比结构性参数

Tab. 6 Initial stress ratio structural parameters

应力路径	侧向固结压力 σ_3 /kPa			
	30	50	70	90
侧向卸荷 b (RTC)	1.94	1.80	1.60	1.41
轴向加荷 b (CTC)	1.39	1.35	1.30	1.27

从表 6 计算结果看, 侧向卸荷条件下的初始结构性参数远大于加荷条件. 而这一规律的实质是侧向卸荷条件下, 当应变相等时重塑样的 $p_{cs} > p_i$, 故原状样单位球应力所承担的剪应力较重塑样更大, 使得应力比结构性参数变大; 而常规加荷条件下则反之. 这一规律一方面指出了侧向卸荷条件下, 土样结构性对土体强度的相对贡献大于常规加荷条件; 另一方面, 也表明应力比结构性参数能很好地刻画不同应力路径下土体结构性对强度影响的相对大小.

3.3 土样深度对土体结构性的影响

随土体深度增加, 图 7 中表现为随固结围压上升, 软黏土应力比结构性参数降低; 损伤趋势则相对一致, 应力比结构性参数最后均趋近于 1. 在试验深度范围内, 初始结构性参数与平均固结压力在试验条件下呈现较好的线性关系:

$$b = A + B\sigma_m, \quad (5)$$

式中: A, B 均为与土样有关的试验参数. 对于侧向卸荷条件下的温州软黏土, $A = -0.007\ 2, B = 2.255\ 1$, 拟合优度 $R^2 = 0.988$, 如图 7 所示.

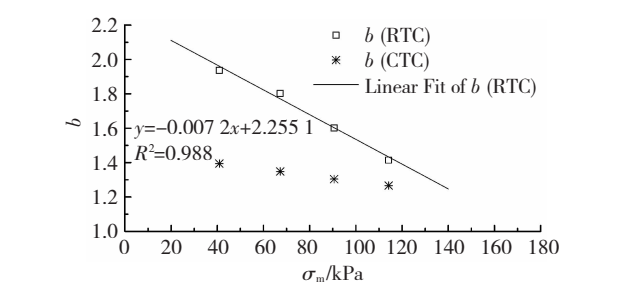


图 7 初始结构性参数与平均固结压力关系曲线

Fig. 7 Curves of initial structural parameters versus average consolidation pressure

事实上, 应力比结构性参数是用于表征土体结构的相对可稳性, 而非绝对可稳性的一个指标. 以往的研究表明^[16], 结构性软黏土随着深度增加固结压力增大, 表现为结构屈服应力与上覆土压力的差值随深度增加而增加, 使得压力增大时土体的结构势表现总体走强. 但从本文应用的结构性参数来看, 围压的作用也会使土体本身具有更大的可稳性; 若随深度增加, 结构屈服应力与上覆土压力的差值对可稳性的贡献增幅较围压作用小, 则会致使最终反映的结构性指标逐渐走弱, 本文试验土样即表现出这种特性.

侧向卸荷条件下温州软黏土在地表处的应力比结构性参数约为重塑土的 2.25 倍, 而深 15 m 处 ($\sigma_m \approx 105$ kPa) 已经衰减为 1.50 倍. 表明施工过程中, 特别是对于卸荷工程而言, 保护浅层土体的结构性对利用土体的天然强度具有尤为重要的意义.

3.4 结构损伤特性分析

为分析结构性随应变的变化, 可将图 6 所示的 $m - \varepsilon_a$ 曲线作归一化和无量纲化处理. 定义 D 为结构性损伤变量, 并令 $\varepsilon = \varepsilon'_a$ ($m = b$) 时, $D_{\varepsilon'_a} = 0$; $\varepsilon = \infty$ ($m = 1$) 时, $D_\infty = 1$. 则结构性损伤函数为

$$D = 1 - \frac{m_{\varepsilon_a} - 1}{b - 1}. \quad (6)$$

基于式(6), 可计算结构损伤特性曲线如图 8 所示, 软黏土结构性的损伤速率可近似分为 3 段: 1) 当 $\varepsilon_a < 2\%$ 时, 土样处于结构性损伤较小的平稳损伤段; 2) 当 $\varepsilon_a \in (2\%, 8\%)$ 时, 土样处于结构性快速损伤的加速损伤段, 损伤速率大于等速损伤速率; 3) 当 $\varepsilon_a > 8\%$ 时, 土样损伤速率逐渐降低, 曲线趋于平缓, 进入减速损伤段.

如图 8 所示, 侧向卸荷条件下, 不同深度的结构损伤特性曲线基本重合, 结构性衰减特征也与前述的三段式损伤规律吻合. 常规加荷条件下, 结构损伤

特性曲线虽仍满足三段式损伤规律,但在加速损伤段其损伤速率明显大于侧向卸荷条件.这是由于天然海积软黏土的力学性质一般仅沿沉积面方向呈横观各向同性,其他方向呈各向异性;而重塑土的力学性质一般为各向同性导致的.当结构性参数定义为原状土与重塑土应力比的比值时,在天然软黏土各向异性的影响下,不同应力路径下土样的结构性衰减规律自然也有所区别.因此,考虑到轴向加荷条件下初始结构性较小,结构损伤速率又较快,对于该路径下变形较大的工程,如模袋围堰等应予以重点关注.

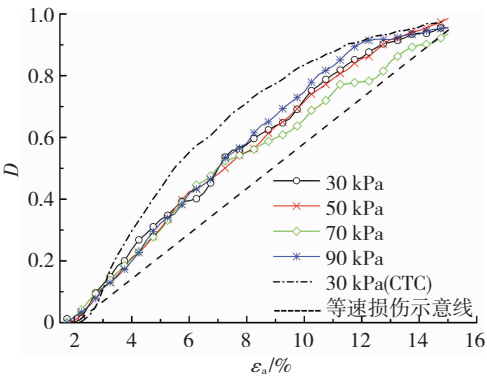


图 8 侧向卸荷条件下的结构损伤特性曲线
Fig. 8 curves under lateral unloading condition

4 结 论

温州结构性软黏土在侧向卸荷条件下的典型力学特性与轴向加荷条件有显著区别,结合三轴固结不排水剪切试验,可发现以下规律:

1)温州原状软黏土具有较强结构性,应力-应变曲线呈现与重塑土相异的应变软化型;随围压增加,土体峰值强度上升,初始切线模量增大,残余强度值与原状土的极限强度趋于同一值.

2)卸荷条件下,受负孔隙水压力的影响原状土总应力强度指标明显大于加荷条件;初始切线模量与平均固结压力呈线性关系,斜率为加荷条件的 1.4 倍;受初始切线模量和球应力影响,侧向卸荷条件下达到峰值强度时对应的应变较常规加荷条件小 0.37% .

3)应力比结构性参数能考虑应力路径对土体结构性的影响.在侧向卸荷条件下初始应力比结构性参数远大于轴向加荷并随深度增加线性减小,表明卸荷工程中保护浅层土体的结构性对利用土体的天然强度具有尤为重要的意义.

4)软黏土的结构损伤曲线可分为平稳损伤、加速损伤和减速损伤三段,不同应力路径下结构损伤速率的差异与其各向异性有关.温州软黏土在常规加荷条件下,加速损伤段的损伤速率明显大于卸荷条件,需予以重点关注.

参考文献

[1] 李作勤. 有结构强度的欠压密土的力学特性[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1):34
LI Zuoqin. Mechanical characteristics of under-consolidated clay soils with structural strength[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4(1):34. DOI:10.3321/j. issn:1000-4548. 1982.01.004

[2] 沈珠江. 结构性粘土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3):21
SHEN Zhujiang. An elasto-plastic damage model for cemented clays [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 21. DOI:10.3321/j. issn:1000-4548. 1993.03.003

[3] ROUAINIA M, MUIR W D. A kinematic hardening constitutive model for natural clays with loss of structure[J]. Géotechnique, 2000, 50(2): 153. DOI: 10.1680/geot.2000.50.2.153

[4] SUEBSUK J, HORPIBULSUK S, LIU M D. A critical state model for overconsolidated structured clays[J]. Computers &Geotechnics, 2011, 38(5):648. DOI: 10.1016/j. compgeo.2011.03.010

[5] 谢定义, 齐吉林. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6):651
XIE Dingyi, QI Jilin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6):651. DOI:10.3321/j. issn:1000-4548. 1999.06.003

[6] 陈存礼, 胡再强, 高鹏. 原状黄土的结构性及其与变形特性关系研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(11):1891
CHEN Cunli, HU Zaiqiang, GAO Peng. Research on relationship between structure and deformation property of intact loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11):1891. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4548. 2007.09.009

[7] 陈存礼, 高鹏, 何军芳. 考虑结构性影响的原状黄土等效线性模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9):1330
CHEN Cunli, GAO Peng, HE Junfang. Equivalent linear model of intact loess considering structural effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9):1330. DOI:10.3321/j. issn:1000-4548. 2007.09.009

[8] ROWE R K, GNANENDRAN C T, LANDVA A O, et al. Calculated and observed behaviour of a reinforced embankment over soft compressible soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(2): 324. DOI:org/10.1139/t96-010

[9] 邓国华, 邵生俊, 陈昌禄,等. 一个可考虑球应力和剪应力共同作用的结构性参数[J]. 岩土力学, 2012, 33(8):2310
DENG Guohua, SHAO Shengjun, CHEN Cunli, et al. A structural parameter reflecting coupling action between shear stress and spherical stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2310. DOI:10.3969/j. issn. 1000-7598.2012.08.012

[10] 邓国华, 邵生俊. 基于真三轴试验的黄土结构性变化规律研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3):679
DENG Guohua, SHAO Shengjun. Research on change structural characteristics of loess based on true triaxialtests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3):679

[11] 邓国华. 真三轴条件下黄土的结构性参数及结构性本构关系研究[D]. 西安:西安理工大学, 2009

- DENG Guohua. Research on structure parameter of loess and structure constitutiverelations under true tri-axial condition[D]. Xi'an University of Technology, 2009
- [12]熊春发,孔令伟,杨爱武. 加荷模式对海积软黏土结构损伤性状的影响分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1892
XIONG Chunfa, KONG Lingwei, YANG Aiwu. Analysis of influence of loading mode on character of structural damage of marine soft clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(7): 1892
- [13]宰金珉,张云军,王旭东,等. 卸荷状态下黏性土的变形和强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1409
ZAI Jinmin, ZHANG Yunjun, WANG Xudong, et al. Experimental research on deformation and strength of cohesive soil under lateral extension[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2007, 29(9): 1409. DOI:10.3321/j. issn:1000-4548. 2007. 09. 021
- [14]周秋娟,陈晓平,徐光明. 软土基坑离心模型试验及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2342
ZHOU Qiujuan, Chen Xiaoping, XU Guangming. Centrifugal model test and numerical simulation of soft soil foundation pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2342
- [15]周秋娟,陈晓平. 侧向卸荷条件下软土典型力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(11): 2215
ZHOU Qiujuan, CHEN Xiaoping. Test research on typical mechanical characteristics of soft clay under lateral unloading condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(11): 2215. DOI:10.3321/j. issn:1000-6915. 2009. 11. 008
- [16]刘用海. 宁波软土工程特性及其本构模型应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008
LIU Yonghai. Study on engineering property and application of constitutive model of Ningbo clay [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008
- [17]王国欣,肖树芳,周旺高. 原状结构性土先期固结压力及结构强度的确定[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 249
WANG Guoxin, XIAO Shufang, ZHOU Wanggao. Determination of preconsolidation pressure and structural strength of undisturbed structuralsoils [J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2003, 25(2): 249. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4548. 2003. 02. 030
- [18]陈铁林,周成,沈珠江. 结构性黏土压缩和剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 31
CHEN Tielin, ZHOU Cheng, SHEN Zhujiang. Compression and shear test of structured clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2004, 26(1): 31. DOI:10.3321/j. issn:1000-4548. 2004. 01. 005
- [19]黄质宏,朱立军,廖义玲,等. 不同应力路径下红粘土的力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2599
HUANG Zhihong, ZHU Lijun, LIAO Yiling, et al. Mechanical properties of red clay under different stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2599. DOI:10.3321/j. issn:1000-6915. 2004. 15. 022
- [20]VAID Y P. Effect of consolidation history and stress path on hyperbolic stress-strain relations [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, 22: 172. DOI:10.1016/0148-9062(86)91703-1
- [21]DUNCAN J M. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Jour Smf Div, 1970, 96(5): 1629
- [22]刘国彬,侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 22
LIU Guobin, HOU Xueyuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 22. DOI:10.3321/j. issn:1000-4548. 1996. 06. 004
- [23]李玲玲. 结构性软土的性状研究及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2007
LI Lingling. Behavior of structural clay and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007
- [24]潘林有,谢新宇,罗昕,等. 软土地基实测沉降的拟合和预测[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(11): 1474
PAN Linyou, XIE Xinyu, LUO Xin, et al. Fitting and prediction of observational settlement for soft ground [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(11): 1474. DOI: 10.3321/j. issn: 0367-6234. 2004. 11. 014

(编辑 赵丽莹)