

文章编号: 1000-7598 (2009) 05-1264-07

软土在不同应力路径下的力学特性分析

曾玲玲¹, 陈晓平²

(1. 东南大学 岩土工程研究所, 南京 210096; 2. 暨南大学 力学与土木工程系, 广州 510632)

摘 要: 通过固结不排水剪应力路径试验对广州南沙典型软土在不同固结条件的力学特性进行了系统研究。分析了初始固结状态对软黏土应力路径依赖性的影响, 比较了不同应力路径下土的应力-应变关系特征和孔隙水压力变化规律, 探讨了孔压分布与土体变形特征的关系, 认为侧向卸荷会造成剪应力增加、体应力减小, 从而使土体产生剪胀趋势。研究结果还表明, 不排水条件下的有效应力路径主要与土样初始固结状态有关, 因而同一固结状态下的有效应力路径具有唯一性。另外, 试验中的剪切控制方式对有效应力路径有明显影响, 但对土体抗剪强度的影响可以忽略。

关 键 词: 应力路径; 软土; 室内试验; 力学特性

中图分类号: TU 431; TU 411

文献标识码: A

Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths

ZENG Ling-ling¹, CHEN Xiao-ping²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Department of Mechanics and Civil Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: Based on a series of consolidated-undrained stress path tests, the mechanical characteristics of soft soil from Guangzhou Nansha under different consolidation conditions are systematically studied. The effect of initial consolidation on stress paths dependence of soft clay is analyzed; the characteristics of stress-axial strain relation and pore water pressure distribution under different stress paths are compared; and the connection of pore pressure and soil deformation state is discussed; the lateral unloading will induce shear dilatation of clay soil because of shearing stress increased and volume stress decreased. The test results also show that the effective stress paths under consolidated undrained shear is main related to initial consolidation; as a result the effective stress paths is only one under the same consolidated state. In addition, shear controlled mode of test has evident effect on the effective stress paths, but little influence on soil shear resistance.

Key words: stress path; soft soil; laboratory test; mechanical characteristics

1 引 言

自 Lambe (1967 年) 提出应力路径概念以来, 在土性分析中考虑应力路径的影响经历了一个从理论到实践、又从实践到理论提升的过程, 期间采用最多、也被认为是最有效及可行的研究手段是室内试验。早期的试验对象多集中于各种密度的无黏性土 (Lade 和 Duncan, 1976 年)^[1], 试验成果证明: 砂土的应力-应变状态与应力路径有关。进一步的研究着眼于应力路径对砂土本构模型的影响, 如

Nagaraj (1981 年)^[2]、Cheng (1990 年)^[3]、陆士强 (1989 年)^[4]等, 基于试验成果提出了一些能够考虑具体复杂应力路径的本构模型。近 20 年来, 随着数值计算技术在本领域的应用进展, 一些学者开展了通过应力路径试验成果进行数值建模的研究, 如陈生水 (1995 年)^[5]、王靖涛 (2002 年) 等^[6], 获得了具有机制背景的数值模型。

由于黏性土的状态控制指标较砂土复杂, 更因为黏性土的室内试验控制标准比较难掌握, 因而黏性土应力路径的试验研究无论是数量还是质量都逊

收稿日期: 2007-11-20

基金项目: 广东省水利科技计划项目 (No. 2003-13); 广东省科技计划项目 (No. 2006B37201003); 湖北省环境岩土工程重点实验室开放基金项目 (No. T110503)。

第一作者简介: 曾玲玲, 女, 1983 年生, 博士研究生, 主要从事软土性质和高速公路地基处理研究。E-mail: linglz413@126.com

通讯作者: 陈晓平, 女, 1957 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学教学与科研工作。E-mail: chenxp@jnu.edu.cn

于砂土。但近年来,随着工程实际的需求和试验仪器的更新,黏性土应力路径研究也取得了颇为丰富的成果,如采用真三轴应力路径研究天然软土的力学特性并与重塑土进行对比(Callisto L, 1998年)^[7];采用人工制备结构性土样进行剪切过程中不断改变应力路径的常规三轴试验(Malanraki V, 2001年)^[8];采用真三轴试验研究不同应力路径下天然硬黏土的力学特性(Callisto L, 2002年)^[9]、欠压密土在不同应力路径下的特殊力学性质(刘元雪, 2002年)^[10]、采用常规三轴压缩试验和真三轴平面应变试验研究不同应力路径下土体的变形特性和破坏特性(杨雪强, 2006年)^[11]等。另外,还有卸荷条件下软土特性的研究,如基坑开挖中的应力路径分析(Charles, 1999年)^[12]、上海软土的卸荷模量研究(刘国彬, 1996年)^[13]。上述研究成果从不同角度揭示了应力路径对黏性土力学特性的影响,但由于软黏土具有明显的沉积特点,其力学特性与当前应力状态、应力历史、后续加卸载路径等的关系的归一化有较大的难度,所以现有研究成果一般都是针对特定的初始条件,对于具有明显区域性特点的土体,探讨应力路径对软黏土特性的影响

还有很多工作要做。

本文根据应力路径的研究现状和广州南沙大规模开发需求,选取南沙夹粉细砂的海积软土为研究对象,采用应变控制式三轴仪、应力-应变控制式三轴仪和 GDS 应力路径三轴仪对该区域土样进行了不同固结条件和不同应力路径下的三轴固结不排水剪试验,探讨了固结状态和应力路径对软土的变形特性、强度特性和破坏特性的影响,以期通过试验成果的积累,针对软土特点建立综合考虑复杂固结状态和应力路径影响的本构模型,为工程应用提供依据。

2 试验方案

2.1 试样制备

试样取自地表下 4~16 m 软土层,为珠江三角洲常见的灰黑色淤泥混砂层,含少量贝壳等杂质。为进行足够充分的对比试验,采用扰动土样进行应力路径试验,即通过原状土的统计均值确定土样的含水率和密度,将此均值作为扰动样期望值。原状土样和制备的扰动土样的各项物理力学性质指标见表 1。

表 1 试样的物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical property of samples

土样	物理性质指标						固结快剪指标				
	$w / \%$	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	e_0	$S_r / \%$	G_s	$w_L / \%$	$w_p / \%$	I_p	I_L	c / kPa	$\phi / (^\circ)$
原状土*	44	1.74	1.31	98.60						9	20.04
扰动土	45	1.73	1.23	99.02	2.70	40.44	17.27	24.12	0.77	5.13	19.91

注: *表示 284 个样本统计均值。

2.2 试验方案

(1) 固结方案

应变控制三轴仪围压 σ_3 分别为 100、200、300、400 kPa, 应力控制三轴仪和 GDS 应力路径三轴仪固结过程分别采用等压固结和偏压固结两种方式, 等压固结压力为 100、150、200、300、400 kPa, 偏压应力比 $K = 0.700$ 和 $K = 0.625$ ($K = \sigma_3 / \sigma_1$), 固结压力终值分别为 150、200 kPa。

(2) 剪切方案

应变控制的剪切过程采用 $\Delta s = 0.06 \text{ mm}/\text{min}$ 的剪切速率, 应力控制的剪切过程分别采用模拟堆载过程的轴向加荷增 p 路径、模拟开挖过程侧向卸荷的减 p 路径及轴向加荷侧向卸荷同时进行的等 p 路径, 加卸荷速率 $\Delta q = 0.2 \text{ kPa}/\text{min}$, 为保证土样的饱

和, 减 p 和等 p 路径试验过程中均施加了反压。

图 1 为试验方案 p - q 空间应力路径图, 具体路径设定如表 2 所示。

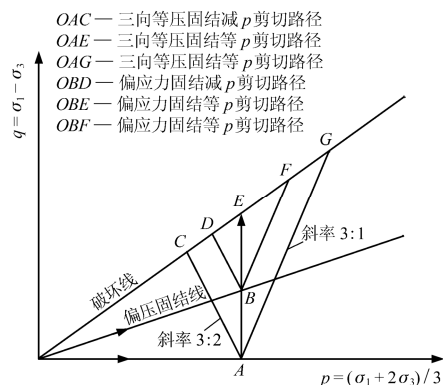


图 1 p - q 空间应力路径
Fig.1 p - q space of stress paths

表 2 应力路径试验方案
Table 2 Stress paths testing program

控制方式	试验编号	固结过程			剪切过程(不排水)		
		固结压力终值/ kPa		固结路径	K	剪切路径	剪切速率
		$p=(\sigma_1+2\sigma_3)/3$	$q=\sigma_1-\sigma_3$				
应变控制	CU ₁₀₀	100	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 不变, σ_1 增大	$\Delta s=0.06$ mm/min
应变控制	CU ₂₀₀	200	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 不变, σ_1 增大	$\Delta s=0.06$ mm/min
应变控制	CU ₃₀₀	300	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 不变, σ_1 增大	$\Delta s=0.06$ mm/min
应变控制	CU ₄₀₀	400	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 不变, σ_1 增大	$\Delta s=0.06$ mm/min
应力控制第 1 组	DEP ₁₀₀₋₁	100	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 减小, σ_1 不变	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 1 组	DEP ₁₅₀₋₁	150	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 减小, σ_1 不变	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 1 组	INP ₁₅₀₋₁	150	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 不变, σ_1 增大	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 1 组	KCP ₁₅₀₋₁	150	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 减小, σ_1 增大	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 1 组	DEP ₁₅₀₋₁	150	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 减小, σ_1 不变	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 1 组	INP ₂₀₀₋₁	200	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 不变, σ_1 增大	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 1 组	KCP ₂₀₀₋₁	200	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 减小, σ_1 增大	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 1 组	DEP ₂₀₀₋₁	200	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 减小, σ_1 不变	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 1 组	INP ₃₀₀₋₁	300	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 不变, σ_1 增大	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 1 组	DEP ₃₀₀₋₁	300	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 减小, σ_1 不变	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 1 组	INP ₄₀₀₋₁	400	0	三向等压固结	$K=1.000$	σ_3 不变, σ_1 增大	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 2 组	INP ₁₅₀₋₂	150	75	偏压	$K=0.625$	σ_3 不变, σ_1 增大	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 2 组	KCP ₁₅₀₋₂	150	75	偏压	$K=0.625$	σ_3 减小, σ_1 增大	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 2 组	DEP ₁₅₀₋₂	150	75	偏压	$K=0.625$	σ_3 减小, σ_1 不变	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 2 组	INP ₂₀₀₋₂	200	75	偏压	$K=0.700$	σ_3 不变, σ_1 增大	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 2 组	KCP ₂₀₀₋₂	200	75	偏压	$K=0.700$	σ_3 减小, σ_1 增大	$\Delta q=0.2$ kPa/min
应力控制第 2 组	DEP ₂₀₀₋₂	200	75	偏压	$K=0.700$	σ_3 减小, σ_1 不变	$\Delta q=0.2$ kPa/min

注: INP(increase pressure)为增 p 剪切路径, KCP(keep constant pressure)为等 p 剪切路径, DEP(decrease pressure)为减 p 剪切路径, $K = \sigma_3 / \sigma_1$ 。

3 试验结果及分析

3.1 不同应力路径下应力-应变关系

不同应力路径下土体应变规律如图 2 所示。图示结果表明, 软黏土在不同应力路径下的性状与初始固结状态有关。在等压固结条件下, 减 p 、等 p 、增 p 剪切路径所获得的剪应力峰值依次递增, 当固结压力有所增加时, 递增幅度亦有所加大(图 2(a)、2(c))。

比较两种固结条件下的应力-应变关系可知, 在同一剪切应力下等压固结后的剪切应变明显大于偏压固结相应值(图 2), 且应力-应变关系呈应变硬化特征, 剪应力峰值强度明显大于屈服强度, 而偏压固结后土体的应力-应变关系有理想弹塑性材料的变形特性。

偏压固结后的剪切性状对应力路径不敏感, 特别是图 2(d)结果显示, 当应变在某一值以下时($\varepsilon_1 = 12\%$), 不同的剪切路径几乎具有同一应力-应变关系, 这一结果在一定程度上揭示软黏土的应力路径依赖性与初始固结状态有关。

3.2 不同应力路径下孔压-应变关系

图 3 为不同固结条件和不同应力路径下孔压-

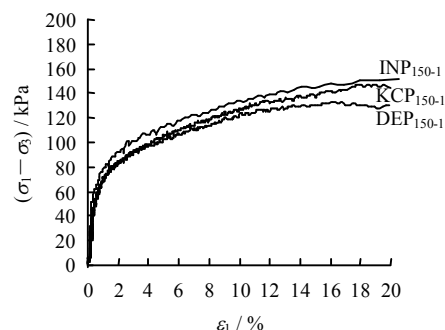
应变关系。由图可见, 不同路径下的孔隙水压力变化规律与土体的变形特征有关, 土体屈服前, 随着应变的增加、孔压增加(增 p 、等 p)或保持固结完成时的状态(减 p); 土体屈服后, 增 p 路径下的孔压保持不变, 等 p 路径下孔隙水压力下降, 减 p 路径下孔隙水压力下降为负值。对于不同的固结状态和固结压力, 孔压数值会有所不同, 但上述规律基本不变。

对于等 p 路径下孔压出现下降的原因, 可认为是由于侧向卸荷使土体产生了一定的弹性膨胀, 而对于减 p 路径下孔压为负的原因, 则是压应力减小造成的弹性变形和剪切引起的塑性变形的综合反映, 即土样在体应力减小到一定程度时出现了剪胀趋势。通常认为, 剪胀是密实砂性土的重要特性。黏性土在卸荷条件的负压多产生于体积弹性膨胀, 但此次试验结果表明, 含少量砂的软弱土在屈服后也会由于剪应力的增加而呈现剪胀现象, 直至土样产生塑性破坏。当土样处于偏应力固结状态时, 剪切过程中孔隙水压力变化幅度较小, 表明在这种固结条件下土体在完成固结的同时已经产生剪切变形, 由此降低了剪切路径下的塑性变形(图 3(b)、3(d)), 此结果从孔压分布规律再次说明不同应力路

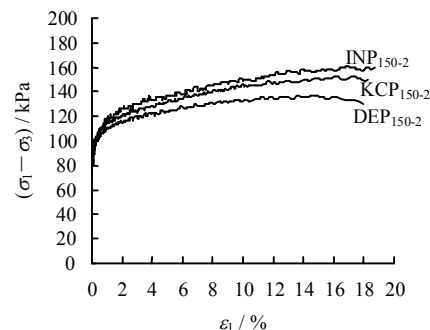
径下软黏土的特性与初始固结状态有关。

由图2和图3所示成果可获得孔压与应力的关系,根据饱和土固结不排水剪孔压系数 A 的定义, $A =$

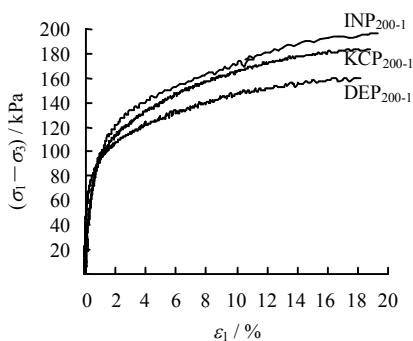
$\Delta u_2 / (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)$,可确定土体在不同应力路径下破坏时的孔压系数 A_f 值列入表3。此结果表明,在同样的剪切路径下偏压固结的孔压系数小于等压固结。



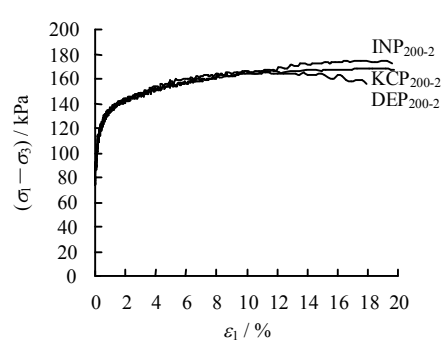
(a) 等向固结 (固结压力 $p = 150$ kPa)



(b) 偏应力固结 (固结压力终值 $p = 150$ kPa, $K = 0.625$)

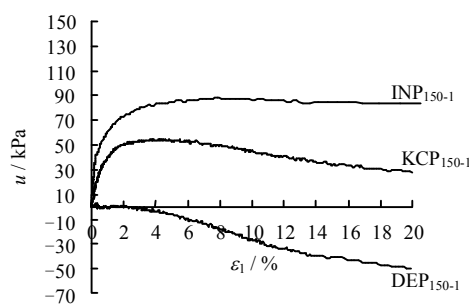


(c) 等向固结 (固结压力 $p = 200$ kPa)

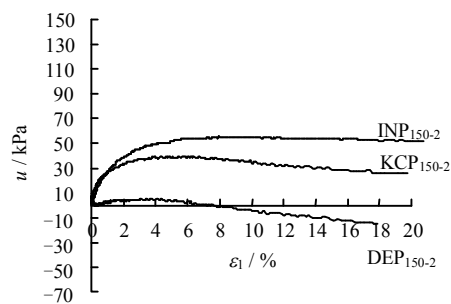


(d) 偏应力固结 (固结压力终值 $p = 200$ kPa, $K = 0.7$)

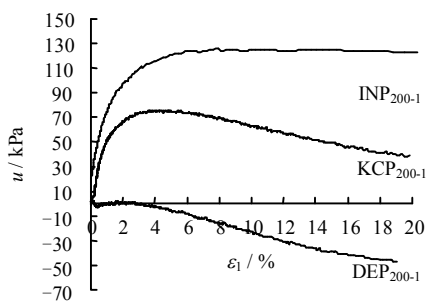
图2 不同应力路径下剪切阶段应力-应变关系曲线
Fig.2 Stress-strain curves under different stress paths



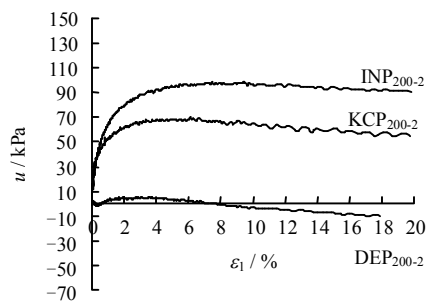
(a) 等向固结 (固结压力 $p = 150$ kPa)



(b) 偏应力固结 (固结压力终值 $p = 150$ kPa, $K = 0.625$)



(c) 等向固结 (固结压力 $p = 200$ kPa)



(d) 偏应力固结 (固结压力终值 $p = 200$ kPa, $K = 0.7$)

图3 不同应力路径下剪切阶段孔压-轴向应变关系曲线
Fig.3 Pore pressure-strain curves under different stress paths

表 3 不同应力路径下土体破坏时孔压系数 A_f 值

Table 3 Pore pressure coefficients under different stress paths while samples destroyed

增 p 路径				等 p 路径				减 p 路径			
INP ₁₅₀₋₁	INP ₂₀₀₋₁	INP ₁₅₀₋₂	INP ₂₀₀₋₂	KCP ₁₅₀₋₁	KCP ₂₀₀₋₁	KCP ₁₅₀₋₂	KCP ₂₀₀₋₂	DEP ₁₅₀₋₁	DEP ₂₀₀₋₁	DEP ₁₅₀₋₂	DEP ₂₀₀₋₂
0.53	0.59	0.35	0.55	0.26	0.36	0.21	0.18	-0.31	-0.25	-0.09	-0.04

3.3 总应力路径与有效应力路径

图 4 为等压固结和偏压固结条件 ($p = 150 \text{ kPa}$) 下总应力路径与有效应力路径在 p - q 坐标系中的关系。结果表明, 土体屈服前, 增 p 路径和等 p 路径下有效应力路径随着偏应力的增大与总应力路径差值增加, 变化规律接近线性, 表明孔压系数近似为常数, 土样屈服后有效应力路径发生偏转并呈非线性。减 p 路径下有效应力路径变化与固结状态有关。等压固结时, 土样在弹性变形阶段有效应力路径与总应力路径基本重合, 土样屈服后由于孔压下降至负值, 造成有效应力路径偏转到总应力路径右边; 偏应力固结时, 有效应力路径与总应力路径基本重合, 表明孔隙水压力在剪切过程中近似为 0。

图 4(d) 表明了不同固结条件下对应于不同总应力路径的有效应力路径性状。结果表明, 土样在所设定的不同总应力路径下进行固结不排水剪切试验

时, 同一固结条件下有效应力路径一致, 无论是等压固结还是偏压固结都服从这一规律, 该结果证明了正常固结黏土 p' - q' - e 的唯一性, 即对于具有同样固结密度 (e 相同) 的土样进行不排水剪切试验时, 由于剪切过程中土体体积 V 保持不变, 因而在物态边界面上对应唯一有效应力路径。

3.4 不同应力路径下的强度包线

图 5 为等压固结条件下增 p 、减 p 路径下有效应力路径和相应的强度包线, 试验分别在应变控制三轴仪和应力控制三轴仪上完成。结果显示, 在同一应力路径下不同剪切控制方式所得的有效应力路径有明显区别 (图 5(a)、5(b)), 表明孔隙水压力滞后现象与剪切控制方式有关, 应变控制剪切过程中滞后现象更为严重, 应在试验中通过装样技术降低其影响。图 5 结果还表明, 土体的抗剪强度指标基本不受剪切控制方式影响。

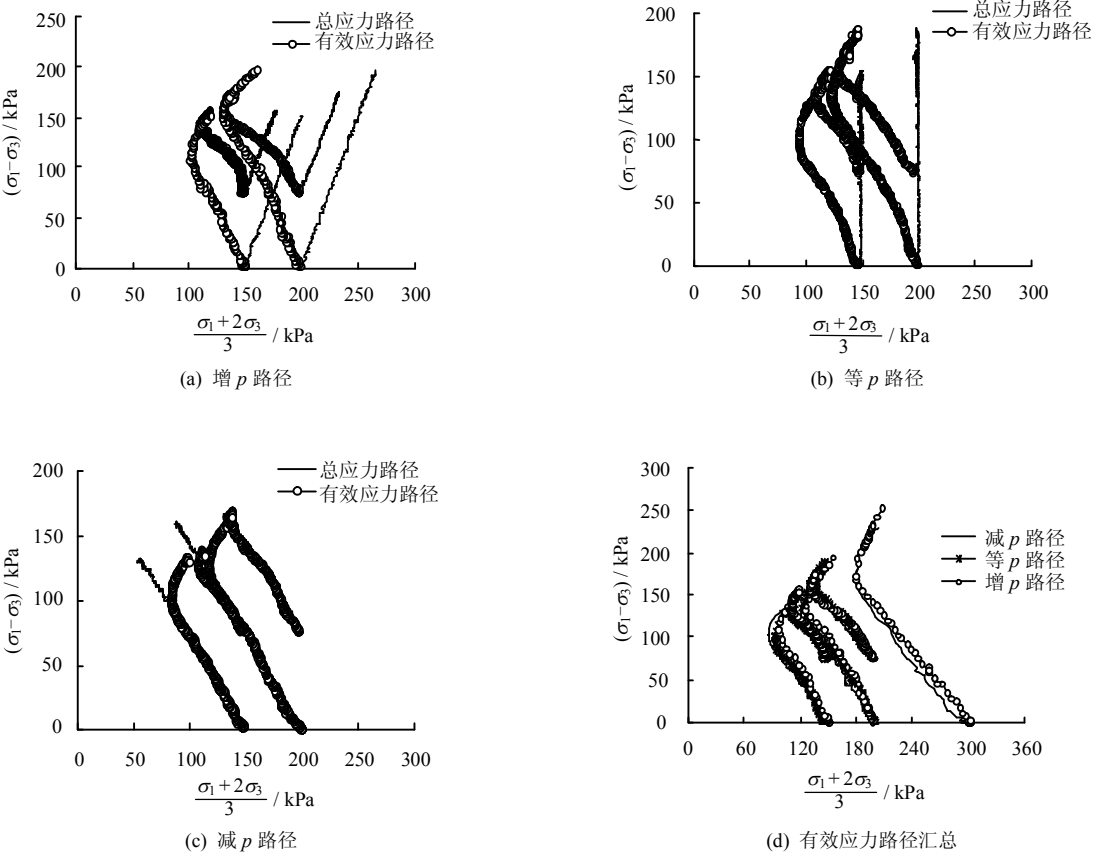


图 4 不同应力路径下的有效应力路径

Fig.4 Effective stress paths under different total stress paths

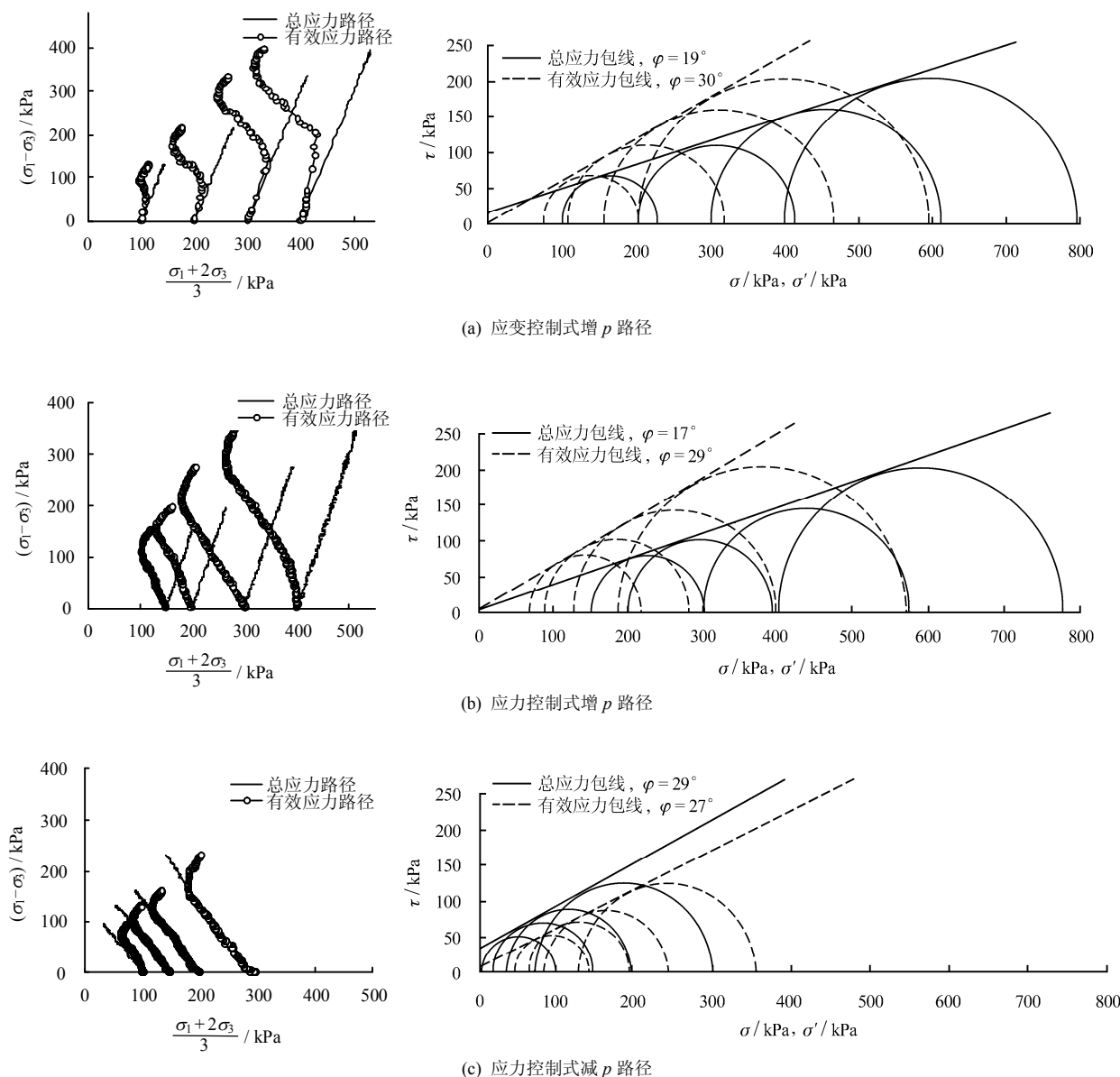


图5 三向等压固结不同剪切路径下的有效应力路径及强度包线

Fig.5 Effective stress paths and strength envelope line of isotropically consolidated-undrained shear paths

4 结 论

通过一系列室内对比试验和试验成果分析, 可以对所研究的软土得到下述认识:

(1) 软黏土在不同应力路径下的性状与初始固结状态有关。在等压固结条件下, 减 p 、等 p 、增 p 剪切路径所获得的剪应力峰值依次递增。随着固结压力的增加, 递增幅度亦有所加大。同一应力路径下等压固结后土样的剪切应变大于偏压固结后的相应值, 且应力-应变关系分别呈应变硬化特征和理想弹塑性材料的变形特性。土样经偏压固结后所显示的剪切性状对应力路径不敏感, 当应变小于屈服值时, 不同的剪切路径几乎具有相同的应力-应变关

系, 表明软黏土应力路径依赖性与初始固结状态有关。

(2) 不同路径下的孔隙水压力变化规律与土体的变形特征有关, 土样屈服与否是影响孔隙水压力分布规律的重要因素。孔压下降的原因对于等 p 路径下可认为是由于侧向卸荷造成的弹性膨胀引起, 而对于减 p 路径则是压应力减小造成的弹性变形和剪切引起的塑性变形的综合反映, 即土样在体应力减小到一定程度时有剪胀趋势。当土样处于偏应力固结状态时, 剪切所产生的塑性变形可减小 (图 3(b)、3(d))。

(3) 土体在固结不排水剪切条件下由于不同应力路径对孔压变化规律的影响使得土体屈服后有效

应力路径发生明显偏转, 固结条件是影响有效应力路径的主要因素, 同一固结条件下的有效应力路径重合, 表明了正常固结黏土具有 $p'-q'-e$ 唯一的特性。

(4) 同一应力路径下不同剪切控制方式所得的有效应力路径有明显的区别, 表明孔隙水压力滞后现象与剪切控制方式有关, 但土体的抗剪强度指标基本不受剪切控制方式影响。

参考文献

- [1] LADE P V, DUNCAN J M. Stress-path dependent behavior of cohesionless soil[J]. **Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE**, 1976, 102(GT1): 42—48.
- [2] NAGARAJ T S, MURTHY M K, SRIDHARAM A. Incremental loading device for stress path and strength testing of soils[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1981, 4(2): 74—78.
- [3] CHENG S R L, LEE I K. Response of granular soil along constant stress increment ratio path[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1990, 116(GT3): 355—376.
- [4] 陆士强, 邱金营. 应力历史对砂土应力-应变关系的影响[J]. 岩土工程学报, 1989, 11 (4): 18—25.
LU Shi-qiang, QIU Jin-ying. Effect of stress history on stress-strain relation of sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1989, 11(4): 18—25.
- [5] 陈生水, 沈珠江, 邴能惠. 复杂应力路径下无黏性土的弹塑性数值模拟[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 20—27.
CHEN Sheng-shui, SHEN Zhu-jiang, LI Neng-hui. A elastoplastic model for cohesionless soils under complex stress paths[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 17(2): 20—27.
- [6] 王靖涛, 杨毅, 张曦映. 考虑应力路径的砂土的神经网络本构关系模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1487—1489.
- WANG Jing-tao, YANG Yi, ZHANG Xi-ying. Neural network constitutive model of sand soil in consideration of stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1487—1489.
- [7] CALLISTO L, CALABRESI G. Mechanical behaviour of a natural soft clay[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(4): 495—513.
- [8] 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.
- [9] CALLISTO L, RAMPOLLO S. Shear strength and small-strain stiffness of a natural clay under general stress conditions[J]. **Geotechnique**, 2002, 52(8): 547—560.
- [10] 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 Yuan-xue, SHI Jian-yong, YI Ying-feng. Experimental study of mechanical characteristics of an incomplete consolidation silty clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(1): 5—9.
- [11] 杨雪强, 朱志政, 韩高升, 等. 不同应力路径下土体的变形特性与破坏特性[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2181—2185.
YANG Xue-qiang, ZHU Zhi-zheng, HAN Gao-sheng, et al. Deformation and failure characteristics of soil mass under different stress paths[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2181—2185.
- [12] CHARLES W W N. Stress paths in relation to deep excavation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1999, 125(5): 357—363.
- [13] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 18—23.
LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(6): 18—23.