

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.06.020

考虑应力路径影响的吹填土结构性特征研究*

杨爱武^{①②③} 雷超炜^{①②} 刘琦^{①②} 孔令伟^③

(^①天津城建大学土木工程学院 天津 300384)

(^②天津市软土特性与工程环境重点实验室 天津 300384)

(^③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 武汉 430071)

摘要 为了研究应力路径对吹填土结构性特征的影响,利用WF应力路径三轴仪对天津滨海新区吹填土进行常规三轴固结不排水试验及 K_0 固结下的增 P 、等 P 、减 P 应力路径试验,同时进行扫描电镜试验。试验结果分析表明,出现结构屈服的应变率在2%左右;减 P 、等 P 、增 P 应力路径下土体结构屈服应力逐渐增大,并且结构屈服应力随着围压的增大而增大,随着累积变形量的增加则保持一定值。微观结构测试分析表明,吹填土体微观结构变化规律受应力路径和累积变形量影响较为明显,土体结构屈服前后,土体微观结构有着明显的差异。

关键词 应力路径 吹填土 累积变形量 结构性 微观结构

中图分类号: P642.3 文献标识码: A

STUDY ON STRUCTURE CHARACTERISTICS CONSIDERING STRESS PATHS OF DREDGER FILL

YANG Aiwu^{①②③} LEI Chaowei^{①②} LIU Qi^{①②} KONG Lingwei^③

(^①Department of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384)

(^②Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300384)

(^③Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract Using the WF Automatic Triaxial System, conventional triaxial tests under consolidated undrained condition have been carried out on the dredger fill of Tianjin Binhai New Area. And the tests of different stress paths under K_0 consolidation condition were carried out. Scanning electron microscopy (SEM) tests also have been carried out. The test results showed that the structure yield when the strain exceed 2%. The structural yielding stress of INP is bigger than KCP, and DEP is the smallest. The yielding stress is increasing with the confining pressure, but maintain a certain value with the increase of cumulative deformation. Analysis of microstructure test showed that the effect of stress paths and damage degree on the microstructure of dredger fill is significant. The soil microstructure is quite different before and after the yield of soil structure.

Key words Stress paths, Dredger fill, Cumulative deformation, Structure characteristics, Microstructure

* 收稿日期: 2014-11-18; 收到修改稿日期: 2015-04-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372291, 51179186) 天津市科技计划项目(15JCZDJC40600, 15ZCZDSF00220) 资助.

第一作者简介: 杨爱武(1971-), 男, 博士, 教授, 从事软土地基处理及土体微观结构研究. Email: tulilab@163.com

0 引言

近年来,不少学者对受应力路径影响的结构性土进行了大量试验和理论研究,取得了丰硕的成果。如 Callisto et al.(1998)对天然软土进行真三轴应力路径试验,研究了天然软土与重塑土的力学特性,并将两者进行对比; Malanraki et al.(2001)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,研究了应力路径对土体应力-应变关系的影响; 刘恩龙(2006)对结构性土在不同应力路径下的力学特性进行了研究,指出开展结构性土在不同应力路径下的力学特性的试验研究可以为建立复杂应力路径下的合理结构性本构模型提供试验依据; 陈林靖等(2011)对典型饱和软土进行了一系列应力路径试验,研究了土体卸载及加载情况下的应力-应变特征; 曾玲玲等(2009)采用广州南沙典型软土为试验对象,对其进行固结不排水剪应力路径试验,研究了不同固结条件下广州南沙典型软土的力学特性; 翁鑫荣(2013)通过原状软土的等向固结和 K_0 固结不排水三轴试验,分析讨论了软土的剪切强度、孔隙水压力和有效应力路径特性; 杨雪强等(2006)通过对土体进行常规三轴压缩试验和真三轴平面应变试验,指出了土体在加荷与卸荷两种情况下的变形特性和破坏特性; 梁燕等(2007)通过对陇西 Q_3 原状黄土进行应力路径试验,指出当黄土各向异性程度较小时,应力路径对黄土的固结不排水抗剪强度有一定的影响。研究者们对土体力学特性受其结构性的影响的研究主要集中在固结特性、压缩特性、强度特性等方面,如刘维正等(2010)通过室内的固结压缩试验,探讨了长江漫滩相天然沉积软土的物理力学性质,指出软弱土层沉积过程中形成的固结屈服压力和结构强度对其工程特性的影响相对更加显著; 王立忠等(2004)通过不同加压率下的固结试验,分析了原状土在不同加压率下的压缩特性,并与重塑土进行对比; 邵生俊等(2008)通过原状黄土的应力-应变变化规律,依据抗剪强度随结构性参数的变化规律,研究了黄土结构性对其强度的影响。

综上所述,土在不同应力路径下的力学性质以及土体结构性对力学特性的影响研究已经取得较大进展,但应力路径对土体结构性特征影响方面的研究成果并不多,还有很多工作要做(江美英等,2009)。本文以天津滨海新区吹填土为研究对象,深入研究考虑应力路径影响的结构性特征,从本质上揭示由应力路径变化而引起的吹填土体力学特性变化,为吹填场地合理而有效地利用土体结构性进行设计施工提供支持。

1 试验方案

1.1 试样基本性质

本文试验材料为经过初步地基处理的天津滨海新区吹填土,试样深度为地表下 4.0~10.0m,各项物理力学性质指标统计(表1),原状土与重塑土三轴固结不排水试验应力-应变关系曲线(图1)。天津滨海新区吹填土是有泥浆经过真空预压后得到有一定强度的软土,真空预压处理时地表真空度一般为 80kPa,传到地下 4~10m 时的固结压力大约为 20~50kPa(岑仰润,2003)。

表1数据说明经过初步地基处理的天津滨海新区吹填土为高含水量软土,力学特性较差。由图1可以看出,在不同围压下,原状土应力-应变曲线未见有明显的台坎,但存在结构强度,可通过数值处理方法(沈恺伦,2006)得到其结构屈服应力,所对应位置即为三轴应力-应变曲线中的拐点(图中用小圈标出)处。重塑土应力-应变关系曲线较圆滑,不见有台坎,在低围压下近乎直线,当围压增大到一定程度时出现拐点,经过数值处理(沈恺伦,2006)后,得到其屈服应力。在相同围压下,原状土的主应力差比重塑土要大,随着围压的增大,这种差异在逐渐增大。分析其原因,可认为这是由于围压越大,原状土在固结过程中排出的水越多,土体越紧密,峰值应力随着围压的增大而明显增大,而重塑土在固结过程中逐渐形成新的结构,但由于固结时间较短,所形成的新结构并不稳定,不同围压固结所形成的新结构差异并不大,所以其峰值应力随围压的变化较小,从而导致原状土与重塑土峰值主应力差随着围压的

表1 土样基本物理力学指标

Table 1 Basic physical parameters of soil samples

取样深度 H /m	含水量 ω /%	密度 ρ /g·cm ⁻³	比重 G_s	饱和度 S_r /%	孔隙比 e	液限 W_L /%	塑限 W_p /%	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	压缩模量 E_s /MPa
4.0~10.0	47.1	1.76	2.75	100.0	1.290	43.3	25.5	17.8	1.213	2.513

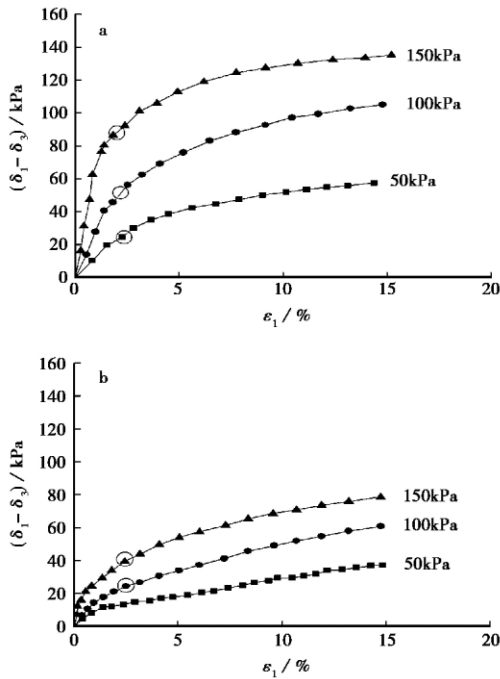


图1 三轴应力-应变关系
Fig. 1 Stress-strain relations of triaxial test
a. 原状土; b. 重塑土

增大其差异越来越大。

1.2 试验方案

本文进行增 P (σ_1 增大 σ_3 不变)、等 P (σ_1 增大 σ_3 减小)、减 P (σ_1 不变 σ_3 减小) 3种应力路径试验,具体试验方案示意图(图2)。

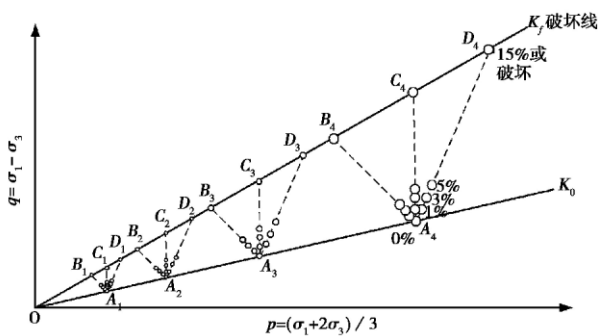


图2 p - q 应力路径空间
Fig. 2 The stress path space of p - q

1.2.1 固结阶段

在图2中, A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 对应的 K_0 固结压力分别为 30kPa、60kPa、90kPa、120kPa。每个围压及每条应力路径的试验方案都相同。以围压 30kPa、应力路径 A_1D_1 为例: K_0 固结到 A_1 点。

1.2.2 应力路径阶段

按照图2所示的应力路径方案,在不排水的条

件下施加偏应力 q ,分别控制应变为 1%、3%、5%、15%时暂停试验,得到累积变形量不同的试样(也可认为得到的是不同结构损伤程度的试样)。

1.2.3 常规三轴剪切阶段

对累积变形量不同的试样进行应变控制的常规三轴不固结不排水剪切试验,直到土体破坏为止,确定其结构屈服应力(王国欣等,2005),同时对土样进行微观结构制样、电镜扫描及定量分析。

2 试验结果与分析

由于不同固结围压下试验结果具有相似性,限于篇幅,仅列举 30kPa 和 120kPa 围压下不同应力路径下不同应变量的试验曲线(图3,图4)。

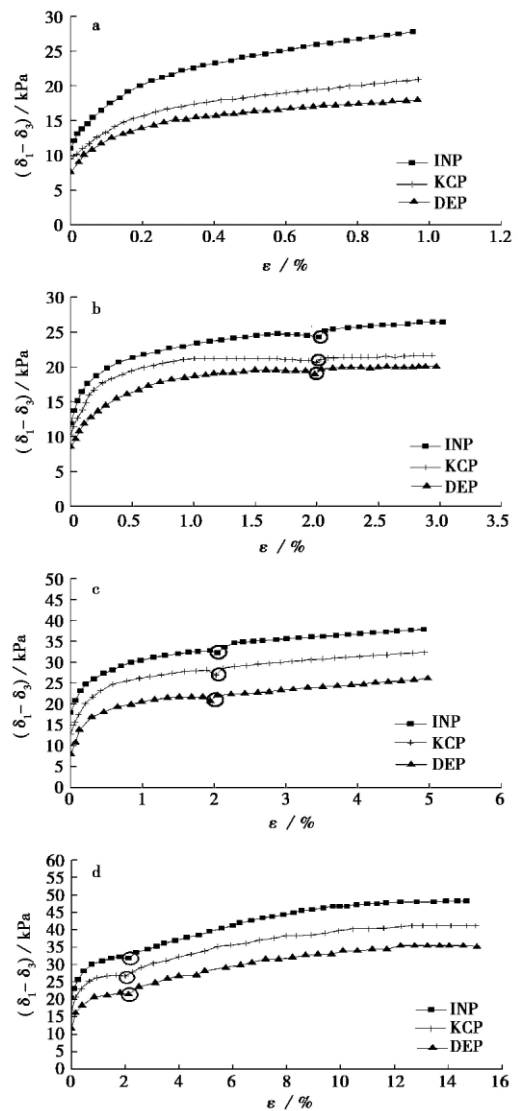


图3 围压 30kPa 不同应力路径阶段的应力-应变关系曲线
Fig. 3 The stress-strain curves under different stress paths with 30kPa confining pressure

a. 应变量为 1%; b. 应变量为 3%; c. 应变量为 5%; d. 应变量为 15%

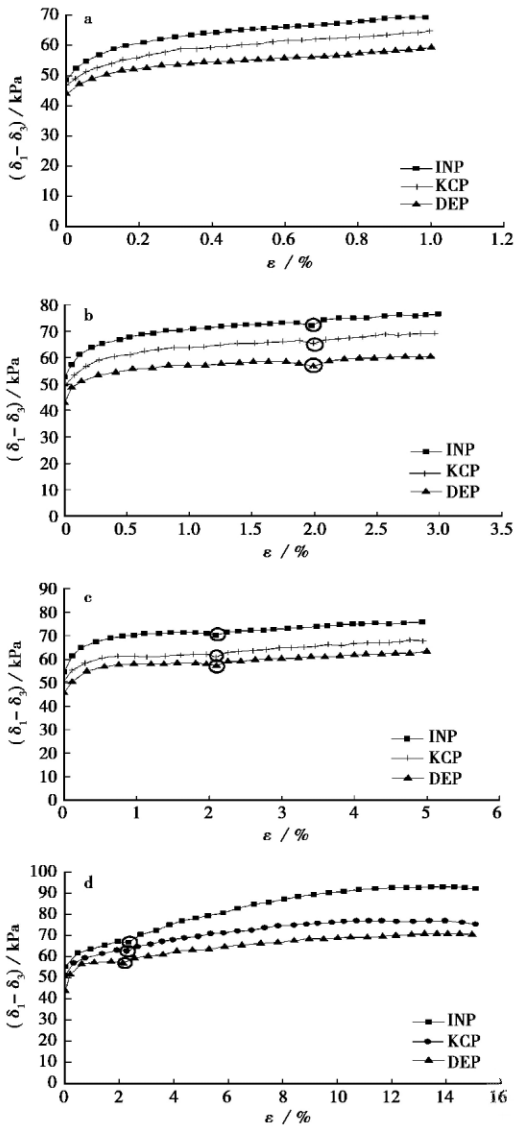


图4 围压 120kPa 不同应力路径阶段的应力-应变关系曲线
 Fig. 4 The stress-strain curves under different stress paths with 120kPa confining pressure
 a.应变量为 1%; b.应变量为 3%; c.应变量为 5%; d.应变量为 15%

由图 3 和图 4 可以看出,应力路径阶段应变量为 1% 时,没有出现拐点。而当应变量大 于 等于 3% 时,出现了明显的拐点,拐点(图中用小圈标出)处对应的应变量为 2% 左右。由此可认为,土体的应变 量 小 于 2% 时,结构破损量较少,而当土体的应变 量 超 过 2% 时,土体的结构逐步损伤,直至结构彻底 破 坏。

综合本文所有试验结果可以认为, K_0 固结后土 体中应力超过剪切屈服应力后,其应力-应变曲线逐 渐呈稳定趋势,较小的应力增量会导致很大的应变, 即表现出类似理想弹塑性材料的变形特性。在相同 围压及应变条件下,峰值应力在增 P 路径下最大,

减 P 路径下最小,等 P 路径下的峰值应力则介于两 者之间。随着固结围压的增大,峰值应力差逐渐增 大。这一特征可用图 5 进行分析,由图 5 可以明显 看出当固结围压增大时,增 P 、等 P 、减 P 应力路 径之间的峰值应力差越来越大。原因是减 P 路径下, 出现拉应力,土体最易破坏;增 P 路径下,围压固 定,对土体有束缚作用,强度提高;等 P 路径下,介 于两者之间。

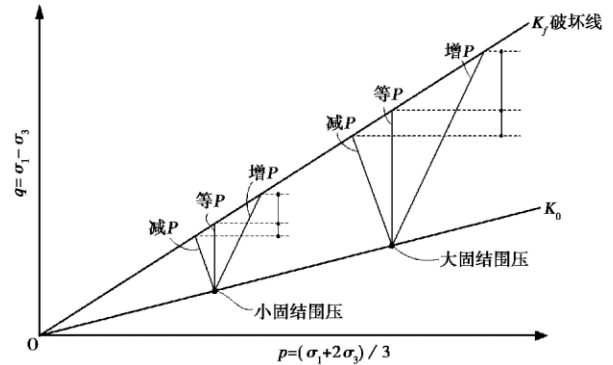


图 5 不同应力路径与破坏线 K_f 的关系图

Fig. 5 Relationship between different stress path and K_f line

王国欣等(2005)通过常规三轴固结排水剪切 试验对杭州海积软土应力-应变特征的研究发现,虽 然典型应变软化型结构土与软土都属于结构性土, 但是力学特性却并不一致,其结构屈服应力的确定 方法也不尽相同,对于典型结构性土应变软化型的 应力-应变曲线,结构屈服应力即为峰值强度;对于 软土应变硬化型应力-应变曲线,结构屈服应力即为 拐点处的剪应力,具体如图 6 所示。

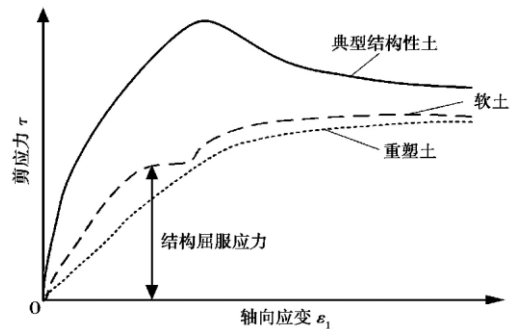


图 6 3 种不同类型土的应力-应变关系曲线示意图
 (据王国欣, 2005)

Fig. 6 Stress-strain curves of three types of soil
 (by Wang, 2005)

参考上述文献研究成果并对本文试验数据进行 处理和分析后发现,在相同围压下,应力路径阶段应

变量为 1% 时没有出现明显拐点,即在应变小于 1% 时,土样还没有达到结构屈服状态;而在应力路径阶段应变量为 3%、5%、15% 时,都出现明显拐点,拐点对应的应力值,即结构屈服应力。不同应力路径下,各级围压下的土体结构屈服应力随应变量的变化曲线如图 7 所示,图中的虚线表示过渡段,在此阶段,随着应力增加慢慢会出现结构屈服。本文试验结果表明出现结构屈服的应变在 2% 左右。

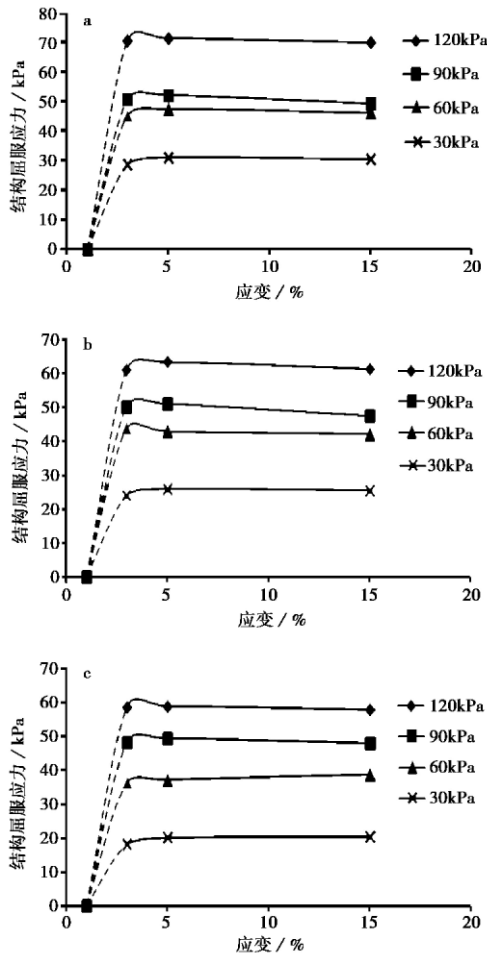


图 7 不同路径的结构屈服应力

Fig. 7 Structure yield stress of different stress paths

a. 增 P 路径; b. 等 P 路径; c. 减 P 路径

由图 7 可以看出,同一应力路径下,累积变形量相同时,随着围压的增大,结构屈服应力增大;随着应变量的增加,结构屈服应力变化不大,基本趋于一定值,也就是说应力路径与围压固定时,结构屈服应力是一定值,与应变大小无关,即外在条件一定时,结构屈服应力反映了土体固有特性,不再为变量。相同围压和应变时,结构屈服应力在增 P 路径下最大,等 P 路径下次之,减 P 路径下最小。总之,吹填软土结构屈服应力受围压与应力路径的影响较

大,应力路径阶段的累积应变对其影响不大。

3 不同应力路径下微观结构研究

为从本质上研究应力路径阶段土体结构性变化,采用真空冷冻升华干燥法制样(避免了干燥过程对土样结构带来的影响),制作不同应力路径下不同累积变形量(应变分别为 1%、3%、5%、15%)的微观试验土样(每种土样预留 3 个微观试样),利用德国生产的 LEO 场发射扫描电子显微镜对平行于剪切破坏面的土样截面进行电镜扫描,典型 SEM 照片如下图 8~图 10 所示。

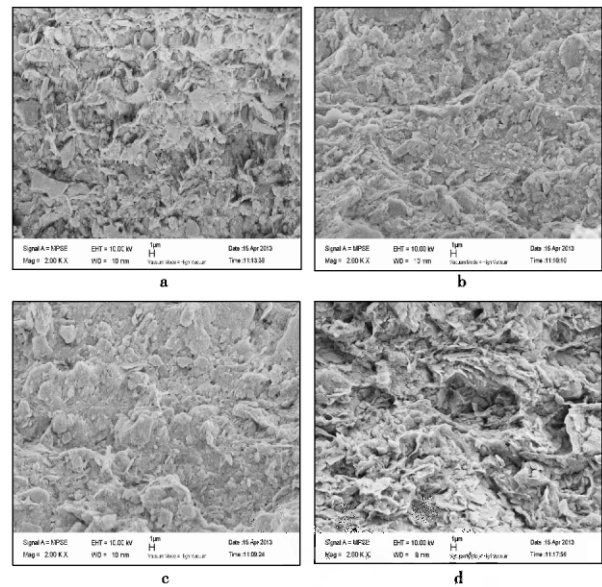


图 8 增 P 阶段微观结构变化图

Fig. 8 Microstructure diagram of INP

a. 应变 1%; b. 应变 3%; c. 应变 5%; d. 应变 15%

由图 8~图 10 可以看出,增 P 应力路径下,小应变下 (<5%) ,随着应变量的增大,土体中孔隙有减少的趋势,颗粒有进一步聚合的趋势,颗粒间距减小,土体变得密实(杨爱武等, 2011)。当应变超过 5% 时,孔隙与颗粒变化呈相反趋势,即数量都呈增大趋势。当应变达到 15% 时,大孔隙明显增多。而等 P 和减 P 应力路径下,随着应变量的增加,颗粒聚合趋势消失,孔隙呈增大趋势。

对图 8~图 10 中 SEM 照片进行定量化分析,首先对扫描照片进行二值化处理,然后采用 Leica Qwin 5000 图像处理系统对二值化处理后的图片进行分析,提取原状样和试验后土样的微观结构信息,分析结果统计(表 2)。

表2 微结构参数分析统计表
Table 2 Analysis table of microstructure parameters

应力路径	变形量	类型	孔径、粒径分布 /%					数量	平均复杂度	平均圆形度	
			<1 μ m	1~2 μ m	2~5 μ m	5~10 μ m	>10 μ m				
增 <i>P</i>	1%	颗粒	79.35	14.45	4.65	0.90	0.65	775	21.422	0.414	
		孔隙	76.71	16.89	5.08	0.99	0.33	906	21.288	0.418	
	3%	颗粒	73.39	19.05	6.42	1.14	0.00	744	20.723	0.422	
		孔隙	77.38	16.28	4.14	1.44	0.76	926	19.876	0.427	
	5%	颗粒	71.84	20.02	7.12	0.61	0.41	728	20.269	0.433	
		孔隙	73.51	17.96	6.65	1.09	0.79	970	19.407	0.438	
	15%	颗粒	69.80	18.62	9.49	0.95	1.14	784	19.975	0.419	
		孔隙	72.35	18.77	7.53	0.86	0.49	1048	19.882	0.407	
	等 <i>P</i>	1%	颗粒	80.95	12.44	4.51	1.24	0.50	730	21.802	0.412
			孔隙	74.59	18.28	4.43	1.42	1.28	893	21.440	0.405
3%		颗粒	81.39	13.05	4.02	1.06	0.30	714	20.413	0.421	
		孔隙	75.88	16.58	5.44	1.44	0.66	906	19.616	0.413	
5%		颗粒	81.04	14.02	4.00	0.61	0.41	708	19.969	0.429	
		孔隙	76.51	16.56	5.45	0.79	0.69	920	18.942	0.421	
15%		颗粒	82.80	13.62	2.49	0.55	0.54	764	20.744	0.409	
		孔隙	80.65	16.27	2.53	0.46	0.39	968	19.786	0.411	
减 <i>P</i>		1%	颗粒	81.95	13.44	3.50	0.71	0.40	780	19.712	0.412
			孔隙	80.59	14.28	3.21	1.34	0.58	1023	19.140	0.407
	3%	颗粒	82.39	15.05	2.02	0.44	0.10	944	20.733	0.395	
		孔隙	81.38	15.28	2.14	0.84	0.36	1126	19.878	0.383	
	5%	颗粒	82.84	14.52	1.72	0.61	0.31	998	21.259	0.373	
		孔隙	83.51	14.46	1.15	0.59	0.29	1170	20.409	0.355	
	15%	颗粒	84.80	13.62	0.99	0.45	0.14	1084	22.975	0.359	
		孔隙	84.81	13.77	0.95	0.36	0.11	1249	21.485	0.347	

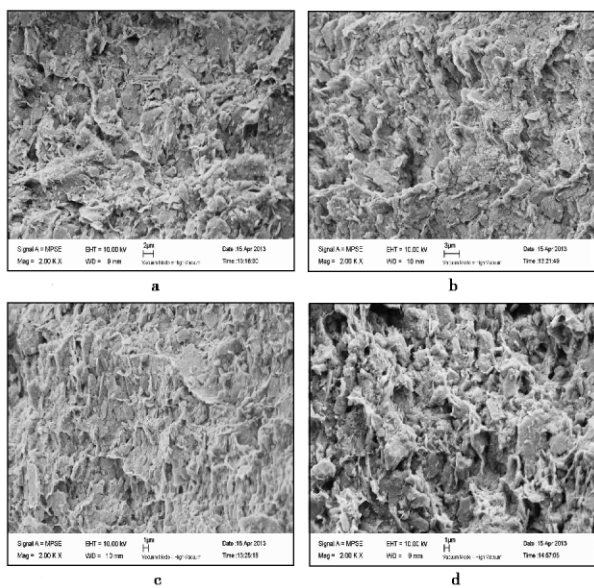


图9 等 *p* 阶段微观结构变化图

Fig. 9 Microstructure diagram of KCP

a. 应变 1%; b. 应变 3%; c. 应变 5%; d. 应变 15%

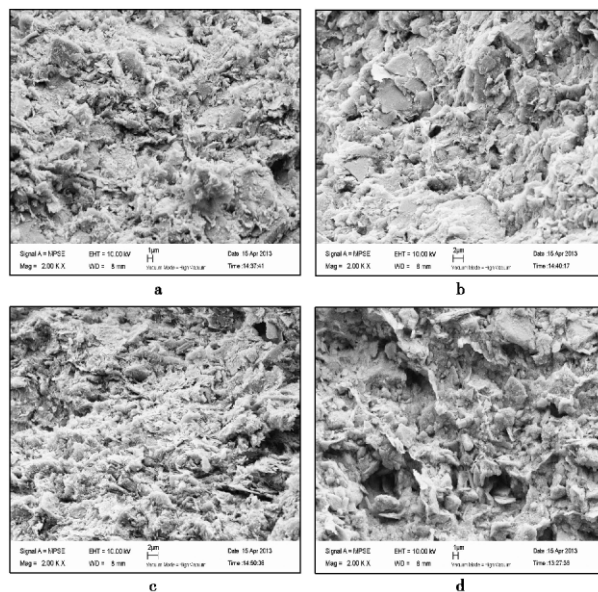


图10 减 *p* 阶段微观结构变化图

Fig. 10 Microstructure diagram of DEP

a. 应变 1%; b. 应变 3%; c. 应变 5%; d. 应变 15%

由表 2 可以看出,不同应力路径下颗粒与孔隙大小主要分布在 $<1\mu\text{m}$ 以及 $1\sim 2\mu\text{m}$ 。增 P 应力路径下,随着变形量的增大,土样在破坏前颗粒与孔隙在粒径(孔径) $<1\mu\text{m}$ 的分布减少, $1\sim 2\mu\text{m}$ 、 $5\sim 10\mu\text{m}$ 、 $>10\mu\text{m}$ 的分布略有增加,即颗粒与孔隙在外力作用下有逐渐均匀化的趋势,颗粒与孔隙复杂度呈降低趋势,即颗粒与孔隙总体形状趋向圆形化,颗粒与孔隙圆形度呈增大趋势,土样破坏后则都呈相反的变化趋势。等 P 应力路径下,随着变形量的增大,颗粒与孔隙在粒径(孔径) $<1\mu\text{m}$ 、 $1\sim 2\mu\text{m}$ 的分布增加, $5\sim 10\mu\text{m}$ 、 $>10\mu\text{m}$ 的分布减小;颗粒与孔隙复杂度、圆形度在破坏前,前者呈降低趋势,后者呈增大趋势,破坏后则呈相反趋势。减 P 应力路径下,随着变形量增大,颗粒与孔隙在粒径(孔径) $<1\mu\text{m}$ 、 $1\sim 2\mu\text{m}$ 的分布增加, $5\sim 10\mu\text{m}$ 、 $>10\mu\text{m}$ 的分布减小,颗粒与孔隙复杂度呈增大趋势,圆形度呈降低趋势。总之,随着变形量的增大,土体微观结构在不同应力路径下会呈现不一样的变化趋势,主要是由于土体结构性存在,这也从微观结构上解释了土体力学性质变化的原因。

4 讨 论

分析以上研究结果后发现,不同的应力路径对吹填软土结构性有较大的影响,其中减 P 路径对土体结构性影响最大,等 P 路径次之,增 P 路径对其影响最小。产生上述现象的原因主要是减 P 路径下,受力状况为轴向荷载不变、侧向卸载,土体中出现拉应力,从而使土样在完全破坏前结构产生大量破坏,破坏前后变化不明显;增 P 路径下,轴向和侧向都处于加载状态,从而对土样有一定的束缚作用,这对土样的强度和结构性的维持有一定的作用,但破坏后,由于结构完全破损,所以会产生相反的现象;等 P 路径下,受力状况为轴向加载,侧向卸载,土体受力情况处于增 P 与减 P 之间,因此结构变化特征介于两者之间。应用应力路径的方法分析吹填软土的结构性接近土体现场实际,因此最为合理。

5 结 论

(1) 不同应力路径下土体结构状态与累积应变量有关,当累积应变量超过 2% 时,土体的结构逐步损伤,直至结构彻底破坏。

(2) 应力路径对土体强度有一定的影响。增 P

路径的峰值应力(q 值)最大,等 P 路径的峰值应力居中,减 P 路径的峰值应力最低。同一应力路径条件下,累积变形量相同时,随着围压的增大,结构屈服应力增大;围压及应力路径固定时,随着累积变形量的增加,结构屈服应力变化不大,基本上趋于一定值,即应力路径与围压固定时,结构屈服应力是一定值,与累积变形量大小无关。

(3) 结构性软土微结构变化影响因素较多,其中应力路径与累积变形量对其影响较为明显。

参 考 文 献

- Callisto L, Calabresi G. 1998. Mechanical behavior of natural soft clay[J]. *Géotechnique* **48**(4): 495~513.
- Gen Y R. 2003. Vacuum preloading: Experiment and theory[D]. Hangzhou: Zhejiang University.
- Chen L J, Dai Z Q, Liu Z W. 2011. Experimental study of stress path of soft soils in influence range of foundation pit[J]. *Rock and Soil Mechanics* **32**(11): 3249~3257.
- Jiang M Y, Luo Y S. 2009. Influence of stress path on structural characteristic of loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 30 (supp(2)): 235~238.
- Liang Y, Xie Y L, Liu B J. 2007. Influence of stress path on consolidated undrained shear strength of loess[J]. *Rock and Soil Mechanics* **28**(2): 364~366.
- Liu E L, Shen Z J. 2006. Mechanical behavior of structured soils under different stress paths[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* **25**(10): 2058~2064.
- Liu W Z, Shi M L. 2010. Structural characteristic and engineering effect analysis of Yangtze River backswamp soft soil[J]. *Rock and Soil Mechanics* **31**(2): 427~432.
- Malandraki V, Toll D. 2001. Triaxial Tests on Weakly Bonded Soil with Changes in Stress Path[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **127**(3): 282~291.
- Shao S J, Deng G H. 2008. The strength characteristics of loess with different structures and its application in analyzing the earth pressure on loess tunnel[J]. *China Civil Engineering Journal* **41**(11): 93~98.
- Shen K L. 2006. Structure of soft clay, Plastic anisotropy and its evolution[D]. Hangzhou: Zhejiang University.
- Wang G X, Xiao S F, Huang H W. 2005. Study on stress-strain characteristics and damage rule of structural strength for marine soft soil in Hangzhou [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* **24**(9): 1555~1560.
- Wang L Z, Ding L, Chen Y M, et al. 2004. Study on compressibility of structured soft soil[J]. *China Civil Engineering Journal* **37**(4): 46~53.
- Wen X R. 2013. Experimental research on characteristics of stress path for soft soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* **35**(2): 825~828.

- Yang A W, Yan S W, Du D J. 2011. A study of the formation of structure yield stress subject to creep of the soft dredger fill [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, **38**(6): 62~67.
- Yang X Q, Zhu Z Z, Han G S, et al. 2006. Deformation and failure characteristics of soil mass under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, **27**(12): 2181~2185.
- Zeng L L, Chen X P. 2009. Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, **30**(5): 1264~1270.
- 岑仰润. 2003. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 陈林靖, 戴自航, 刘志伟. 2011. 应力路径对软土应力-应变特性影响试验研究[J]. 岩土力学, **32**(11): 3249~3257.
- 江美英, 骆亚生. 2009. 应力路径对黄土结构性的影响[J]. 岩土力学, **30**, supp(2): 235~238.
- 梁燕, 谢永利, 刘保健. 2007. 应力路径对黄土固结不排水剪强度的影响[J]. 岩土力学, **28**(2): 364~366.
- 刘恩龙, 沈珠江. 2006. 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, **25**(10): 2058~2064.
- 刘维正, 石名磊. 2010. 长江漫滩相软土结构性特征及其工程效应分析[J]. 岩土力学, **31**(2): 427~432.
- 邵生俊, 邓国华. 2008. 原状黄土的结构性强度特性及其在黄土隧道围岩压力分析中的应用[J]. 土木工程学报, **41**(11): 93~98.
- 沈恺伦. 2006. 软黏土结构性、塑性各向异性及其演化[D]. 杭州: 浙江大学.
- 王国欣, 肖树芳, 黄宏伟. 2005. 杭州海积软土应力-应变特征与结构强度损伤规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, **24**(9): 1555~1560.
- 王立忠, 丁利, 陈云敏, 等. 2004. 结构性软土压缩特性研究[J]. 土木工程学报, **37**(4): 46~53.
- 翁鑫荣. 2013. 软土应力路径特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, **35**(增2): 825~828.
- 杨爱武, 闫澍旺, 杜东菊. 2011. 蠕变条件下吹填软土结构强度形成研究[J]. 水文地质工程地质, **38**(6): 62~67.
- 杨雪强, 朱志政, 韩高升, 等. 2006. 不同应力路径下土体的变形特性与破坏特性[J]. 岩土力学, **27**(12): 2181~2185.
- 曾玲玲, 陈晓平. 2009. 软土在不同应力路径下的力学特性分析[J]. 岩土力学, **30**(5): 1264~1270.