

原生和次生各向异性对软黏土强度和变形特性影响研究

周 建, 刘正义, 严佳佳

(浙江大学滨海与城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 为更好地地区分原生各向异性和次生各向异性对软黏土的强度和变形特性的影响, 对原生各向异性明显的原状软黏土和基本消除了原生各向异性的重塑黏土, 利用空心圆柱扭剪仪进行了两种不同 b 值下主应力轴偏转角不同的不排水定轴剪切试验。试验结果表明原状黏土的内摩擦角以及归一化强度都随着主应力方向的变化先减小后增加, 而重塑黏土变化不明显, 说明主应力方向变化引起的次生各向异性对重塑黏土强度影响较小。此外, 原生各向异性对土体的应力应变开展有较大影响, 对孔压开展模式基本无影响, 但会影响孔压开展幅值。近似各向同性的重塑土基本消除了原生各向异性, 因此该试验可为主应力轴旋转等复杂应力路径条件下的土体各向异性的深入研究提供较好的参考。

关键词: 主应力方向; 软黏土; 原生各向异性; 次生各向异性; 强度; 应力应变; 孔压

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2013)S2 - 0666 - 05

作者简介: 周 建 (1970 -), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事软黏土力学、地基处理、非饱和土本构模型等方面的研究。E-mail: dzhoujian@yahoo.com。

Effects of inherent and induced anisotropies on strength and deformation characteristics of soft clay

ZHOU Jian, LIU Zheng-yi, YAN Jia-jia

(Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To better distinguish the effects of inherent and stress-induced anisotropies on deformation and strength, consolidated undrained tests on remolded and intact soft clay specimens are carried out using a hollow cylinder apparatus. The tests are conducted by maintaining a fixed principal stress direction with angle α from the vertical direction together with two different fixed values of the intermediate principal stress coefficient b . It is observed that both the friction angle and normalized strength decrease with the increase of α , then have a small growth. However, the variance is not significant for different remolded clay species, so the stress-induced anisotropy caused by change of the principal stress direction has a smaller effect on the strength. Moreover, the inherent anisotropy has a great influence on the stress-strain characteristics and magnitude of pore pressure, and almost no effect on development mode of the pore pressure. Therefore, this study can serve as references for further study on the anisotropy of soft clay under the principal stress rotation.

Key words: principal stress direction; soft clay; inherent anisotropy; stress-induced anisotropy; strength; stress-strain; pore pressure

0 引 言

各向异性在很大程度上影响着土体的性状。根据各向异性产生的原因和表现的不同, 可分为原生各向异性和次生各向异性, 或者称为固有各向异性和应力诱导各向异性。早期对各向异性的研究主要集中于固有各向异性的研究, 采用的方法是采集原状土样, 然后切取与沉积方向不同倾角的圆柱或立方体样, 在常规三轴仪或平面应变仪中进行剪切试验。但 Saada^[1]首次指出了这种方法存在的缺点, 并且建议采用能够使主应力方向偏转的仪器来进行各向异性的研究。次生各向异性的研究主要集中于 K_0 固结对于强度参数

的影响以及主应力轴旋转产生的塑性变形两方面。对于主应力轴旋转下土体的次生各向异性, 国内外许多学者进行了一些理论和实践上的探索, 但对黏性土涉及较少。而中国发达的沿海地区多为软黏土, 因此对其各向异性的研究亟待加强。主应力方向变化的影响是土体次生各向异性的一种表现形式, 而土体原生各向异性是很显著的, 现有试验中主应力方向变化的影响很可能被土样原生各向异性所掩盖, 在日益复杂的工程背景下, 如何恰当合理区分两种不同各向异性下

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50778162, 51178422)

收稿日期: 2013 - 07 - 17

土体特性,是土力学及土体本构理论研究的重要内容,也是解决工程实际问题的迫切需要。因此,分析原生各向异性 and 次生各向异性的区别和内在联系是很有意义的。国际上常用等压固结重塑黏土的不同应力路径来考虑次生各向异性对黏土的作用,重塑黏土的初始原生各向异性相对原状黏土历经几万年,甚至上百万年的沉积历史形成的原生各向异性可忽略不计。基于此,本文以原状黏土和重塑黏土为对象,开展固结不排水定向剪切试验,从强度变化、应力应变关系、孔压开展三方面进行了研究分析;其次,通过分析比较重塑黏土与原状黏土的试验结果,从宏观角度上加深主应力轴旋转下黏土原生和次生各向异性相互作用的认识。

1 试验设计

本文使用的试验仪器为浙江大学 HCA 空心圆柱扭剪仪。所需原状土样(Y黏土)均来自杭州某基坑,重塑土(D黏土)由原状黏土试验的余土制备成均匀泥浆后倒入真空固结筒密封抽吸固结而成。经室内试验测定,土样的物理参数见表1。

表1 土体基本物理参数

Table 1 Physical properties of soft clay

土样代号	比重	密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	液限/%	塑限/%
Y黏土	2.74	1.77	44.3	45.0	18.3
D黏土	2.69	1.91	34.0	40.2	21.0

表2 重塑软黏土试验方案设计

Table 2 Test schemes of remold soft clay

试样编号	加载时各参数变化情况			
	p/kPa	b	α/(°)	q/kPa
D101	150	0	0	增加剪应力至破坏
D102	150	0	30	同上
D103	150	0	45	同上
D104	150	0	60	同上
D105	150	0	90	同上
D201	150	0.5	0	同上
D202	150	0.5	30	同上
D203	150	0.5	45	同上
D204	150	0.5	60	同上
D205	150	0.5	90	同上

采用浙江大学岩土工程研究所研制的切土器,将试样制为200 mm×100 mm×60 mm(高度×外直径×内直径)的空心圆柱状^[2]。随后将试样在HCA中进行饱和及固结。为探究主应力方向变化下黏土原生和次生各向异性关系,本文试验以重塑D黏土和原状Y黏土

为研究对象,进行一系列定向剪切试验,应力路径可分为以下两个阶段:①保持初始剪应力为2.5 kPa,主应力轴偏转角α从0°旋转至设定值;②保持主应力轴偏转角α不变,单纯增加剪应力q直至试样剪切破坏,重塑土具体试验设计方案见表2,原状黏土的试验方设计案见表3。

表3 原状软黏土试验方案设计

Table 3 Test schemes of intact soft clay

试样编号	加载时各参数变化情况			
	p/kPa	b	α/(°)	q/kPa
Y101	150	0	0	增加剪应力至破坏
Y102	150	0	10	同上
Y103	150	0	15	同上
Y104	150	0	25	同上
Y105	150	0	45	同上
Y106	150	0	60	同上
Y107	150	0	75	同上
Y201	150	0.5	0	同上
Y202	150	0.5	10	同上
Y203	150	0.5	15	同上
Y204	150	0.5	25	同上
Y205	150	0.5	45	同上
Y206	150	0.5	60	同上
Y207	150	0.5	75	同上

2 试验结果分析

2.1 强度特性

对复杂应力路径下土体破坏强度标准,沈瑞福等^[3]和郭莹等^[4]分别选取 $\gamma_g=10\%, 5\%$;温晓贵等^[5]对杭州软黏土进行试验研究后得出取广义剪应变峰值作为原状软黏土的剪切破坏强度;而郑鸿宾^[6]得出广义剪应变达8%时,试样的强度发挥度可以达到90%以上,因此建议选取 $\gamma_g=8\%$ 时的强度作为重塑黏土的破坏强度。汪闻韶院士也曾指出,选择容许变形量作为土体破坏标准是比较合理的。

为了更好地解释不同主应力轴旋转角下的强度,假定有效黏聚力为零,选取重塑D黏土破坏(即 $\gamma_g=8\%$)时的强度和原状Y黏土破坏时的数据得到 $b=0, 0.5$ 时,有效内摩擦角 ϕ' 随主应力轴旋转角的变化规律如图1所示,表明当主应力轴旋转角从0°增加到45°时原状Y黏土的内摩擦角 ϕ' 逐渐减小,当主应力轴旋转角超过45°以后内摩擦角 ϕ' 略有增长;这可以用莫尔-库仑破坏准则来解释,土体剪切破坏面与大主应力方向夹角可以由公式得出:

$$\theta_f = 45^\circ - \frac{\phi'}{2} \quad (1)$$

则破裂面与水平面夹角为

$$\beta = \pm(90^\circ - \alpha - \theta_f) = \pm(45^\circ + \frac{\phi'}{2} - \alpha) \quad (2)$$

式中, ϕ' 为土体有效内摩擦角。根据本试验数据计算

得原状土内摩擦角范围为 $10^{\circ} \sim 16^{\circ}$ ，因此土体剪切破坏面与大主应力方向夹角约为 40° ，当 α 增大时，潜在破坏面与水平层面夹角减小，而水平层面滑动阻力最小，故破裂面越接近层面方向，土颗粒越容易发生错动，摩擦角越小。当 $\alpha=50^{\circ}$ 时， $\beta=0^{\circ}$ ，破裂面方向与层面平行，摩擦角最小，土体强度降至最小值。继续改变 α ， β 又从 0 增大，破坏强度回升。而重塑 D 黏土的内摩擦角 ϕ' 随主应力轴旋转角增加有减小趋势，但不明显。说明原状黏土存在较强原生各向异性，而重塑土基本消除。这与 Nakata 等^[7]得出的摩擦角随主应力轴旋转角增大而呈减小趋势的结论一致；Miura 等^[8]在对 Toyoura 砂的研究中发现：主应力轴旋转到 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 之间时土体存在最小摩擦角。Lade 等^[9]认为主应力方向由竖向开始变化时，正交各向异性对降低摩擦角有重要影响。

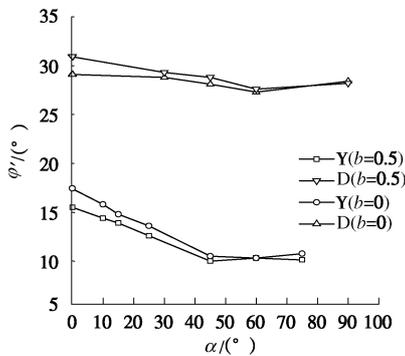


图 1 有效内摩擦角 ϕ' 与主应力轴偏转角关系曲线

Fig. 1 Relationship between friction angle and value of PSD

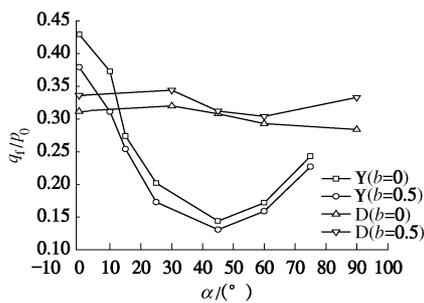


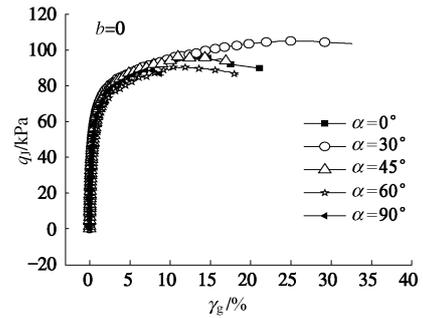
图 2 归一化强度与主应力偏转角关系曲线

Fig. 2 Relationship between normalized strength and value of PSD

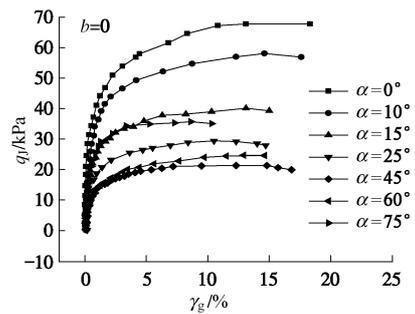
图 2 为重塑黏土与原状黏土主应力轴偏转角 α 与 q_f / p_0 (q_f 为破坏时峰值剪应力， $p_0=150$ kPa) 关系曲线。可以看出， q_f / p_0 跟内摩擦角 ϕ' 变化规律相近，但 45° 以后，增长趋势比摩擦角明显。重塑黏土强度并没有表现出很强的各向异性，而原状黏土原生各向异性显著。根据上述分析，土体强度主要受到原生各向异性影响，而主应力方向变化产生的次生各向异性对土体强度影响较小。

2.2 应力应变特性

空心圆柱试样的单元体中应变主要由 4 个分量构成，定向剪切时各试样的主应力作用方向不同造成了试样单元体中 4 个应变分量的开展程度各不相同。为反映主应力作用不同方向时各应变分量的综合影响，在试验数据整理时通过描述广义剪应变的变化来实现，而不具体考虑 4 个应变分量。图 3, 4 分别为中主应力系数 $b=0, 0.5$ 时，重塑黏土与原状黏土主应力轴旋转角度不同时广义剪应力应变变化曲线。



(a) 重塑黏土



(b) 原状黏土

图 3 不同主应力方向下广义剪应力 - 应变曲线($b=0$)

Fig. 3 Relationship between stress and strain under different PSDs

($b=0$)

由图 3, 4 可见：

(1) 图 3, 4 中广义剪应力应变曲线初始阶段应变开展较小，在不同的 α 角下具有大致相同的初始剪切模量；随着 q 值增加，出现明显的拐点。

(2) 中主应力系数 b 相同时，当 α 从 0° 到 45° 变化时，原状黏土割线剪切模量随着 α 的增加而降低，当 $\alpha > 45^{\circ}$ 后割线剪切模量又有回升。原因是剪应力较低时，主应力方向角 α 的改变促使土颗粒重新排列，但因剪应力较小难以克服原生作用形成的初始定向排列，土颗粒调整非常小，宏观上即表现为剪应变变化不大，不同角下的初始模量基本相同。剪应力较大超过某个值后，土颗粒发生滑动与转动错位，在新的主应力方向下达到平衡状态。类似强度分析时所用的理论，破裂面越接近层面方向，土颗粒越容易发生错动，其宏观表现为变形或应变增加。当 $\alpha = 45^{\circ}$

时,破坏面已接近水平层面方向,因此剪切模量最低。

而重塑黏土不同偏转角对应的应力应变曲线在达到破坏之前较接近,即剪切模量近似,说明所制重塑黏土原始各向异性很不显著,近似各向同性。

(3)从图 3 (a)、4 (a) 中可以看出,重塑黏土整个剪切过程应力应变曲线较少出现应变软化现象。而图 3 (b)、4 (b) 中原状黏土应力应变曲线在后段出现应变软化现象。因此,相应的土体强度标准有所不同,峰值剪应力可作为原状黏土的破坏标准,而重塑黏土选取广义剪应变作为强度标准则较为合适。

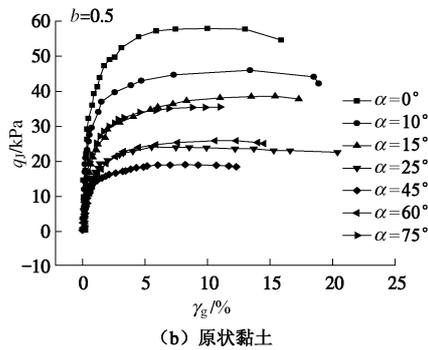
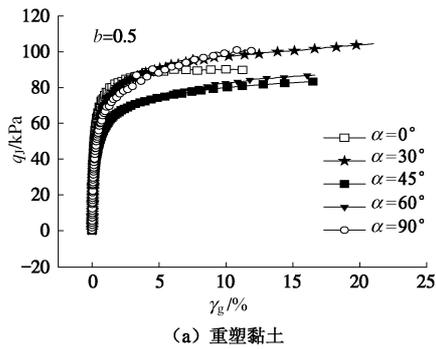


图 4 不同主应力方向下广义剪应力 - 应变曲线(b=0.5)

Fig. 4 Relationship between stress and strain under different PSDs (b=0.5)

2.3 孔压特性

图 5, 6 分别为中主应力系数 $b=0$, $b=0.5$ 时, 重塑黏土与原状黏土主应力轴旋转角度不同时孔压与广义剪应力之间关系曲线。可以发现:

(1)重塑软黏土与原状黏土的孔压在不同主应力方向角下的孔压开展特征基本相同,初始剪切阶段,各试样变化曲线接近,剪应力达到一定值后,孔压增长速率基本关于 45° 对称,即 $0^\circ \sim 45^\circ$ 随角度增加,孔压增长速率增加(通过斜率体现),而 45° 以后再呈递减趋势。主应力轴旋转角并未改变黏土的孔压开展模式,这反映黏土的孔压变化特征主要受次生各向异性的影响。

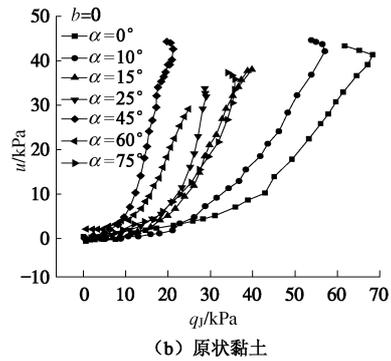
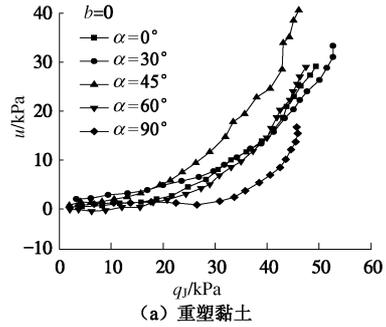


图 5 不同主应力方向下广义剪应力 - 孔压曲线(b=0)

Fig. 5 Relationship between stress and pore pressure under different PSDs (b=0)

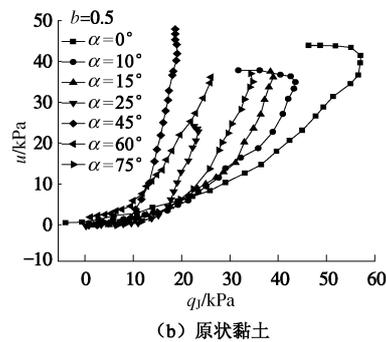
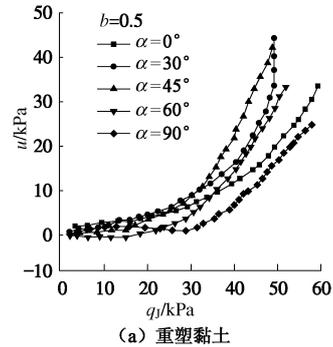


图 6 不同主应力方向下广义剪应力 - 孔压曲线(b=0.5)

Fig. 6 Relationship between stress and pore pressure under different PSDs (b=0.5)

(2)原状软黏土的孔压数据变化范围更大,且在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 偏转角范围内孔压系数增加, 45° 以后又递减的规律更明显,说明原生各向异性对原状黏土孔压

开展幅度有显著影响。而通过对高岭土的试验, Broms 等^[10]也首先证实了主应力轴角度在一定范围内偏转会引起孔压系数上升。

(3) 试样剪切结束时, 不同主应力轴偏转角上试样的孔压并未达到稳定状态, 因此, 不能把稳定孔压作为软黏土破坏判别的标准。

3 结 论

本文通过对杭州地区正常固结原状软黏土和重塑黏土, 开展不同主应力方向定向剪切的试验, 研究了主应力方向变化下两种黏土表现出来的各向异性, 得到以下 4 点结论。

(1) 主应力方向角从 0° 到 45° 增加时, 原状黏土的内摩擦角和应力比 q_f / p_0 均递减, 表现出强烈的各向异性, 内摩擦角在 45° 之后变化并不明显, 应力比有明显增加, 整体变化曲线呈勺形。而重塑黏土变化趋势相比原状黏土不明显, 可见主应力方向变化引起的次生各向异性对土体的强度变化影响较小。

(2) 不同主应力方向的定向剪切应力路径下, 随主应力方向的变化, 重塑黏土应力应变曲线接近, 而原状黏土随着角度增加偏应力呈现减小趋势, 且存在应变软化现象, 说明原生各向异性对土体的应力应变开展有较大影响。

(3) 相似应力路径下重塑黏土与原状黏土的孔压开展特征基本相同。黏土的孔压变化特征主要受次生各向异性的影响, 但开展幅度受原生各向异性控制。

(4) 重塑黏土不存在应变软化现象, 因此不适合将峰值剪应力作为破坏标准, 试样剪切结束时不同主应力方向偏转角上试样的孔压并未达到稳定状态, 因此也不适合把稳定孔压作为黏土破坏判别标准。

主应力轴旋转的影响是土体次生各向异性的一种表现形式, 而原状土体的原生各向异性是很显著的, 通过制备近似各向同性的重塑土近似消除了原生各向异性的影响, 因此本文的试验研究可为主应力轴旋转下的土体次生各向异性的进一步深入, 以探索主应力轴旋转情况下土体产生塑性变形的物理本质提供较好的参考。

参考文献:

[1] SAADA A S. Testing of Anisotropic clay soils[J]. Jour of the soil Mechanical and Foundations Division, ASCE, 1970, **96**(5): 1847 - 1852.
 [2] 沈 扬. 考虑主应力方向变化的原状软黏土试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007. (SHEN Yang. Experimental study on

effect of variation of principal stress orientation on undisturbed soft clay[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese))

- [3] 沈瑞福, 王洪瑾, 周景星. 动主应力轴连续旋转下砂土的动强度[J]. 水利学报, 1996(1): 27 - 33. (SHEN Rui-fu, WANG Hong-jin, ZHOU Jing-xing. Dynamic strength of sand under cyclic rotation of Principal stress directions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(1): 27 - 33. (in Chinese))
- [4] 郭 莹, 栾茂田, 许成顺, 等. 主应力方向变化对松砂不排水动强度特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(6): 666 - 670. (GUO Ying, LUAN Mao-tian, XU Cheng-shun, et al. Effect of variation of principal stress orientation on undrained dynamic strength behavior of loose sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(6): 660 - 670. (in Chinese))
- [5] 温晓贵, 张 勋, 周 建, 等. 复杂应力路径下杭州原状软黏土破坏标准研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(9): 2793 - 2798. (WEN Xiao-gui, ZHANG Xun, ZHOU Jian, et al. Study of failure criterion for Hangzhou intact soft clay under complex stress path[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(9): 2793 - 2798. (in Chinese))
- [6] 郑鸿宾. 主应力轴旋转下重塑黏土与原状黏土特性试验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010. (ZHENG Hong-bin. Experimental study of reconstituted clay and intact clay under principal stress rotation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese))
- [7] NAKATA Y, HYODO M, MURATA H, et al. Flow deformation of sands subjected to principal stress rotation. Soils and Foundations, 1998, **38**(3): 115 - 128.
- [8] MIURA K, MIURA S, TOKI S. Deformation behaviour of anisotropic dense sand under principal stress axes rotation. Soils and Foundations, 1986.26(1): 36-52.
- [9] LADE P V, NAM J, HONG W P. Shear banding and cross-anisotropic behavior observed in laboratory sand tests with stress rotation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, **45**(1): 74 - 84.
- [10] BROMS B B, CASBARIAN A O. Effects of rotation of the principal stress axes and of the intermediate principal stress on the shear strength[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (ICSMFE). Montreal, 1965: 8 - 15.