

两种 K_0 固结土样的强度比及其各向异性

高彦斌

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: K_0 固结(侧向约束的固结)可导致土的各向异性. 通过对比上海软黏土的原状土样和重塑土样的三轴 ACUC(K_0 固结压缩剪切)、ACUE(K_0 固结拉伸剪切)试验以及直剪试验得到的强度比, 研究这两种土样所具有的不同结构对 K_0 正常固结软黏土强度比及其各向异性的影响. 三轴 ACUC、ACUE 试验中, 在 3.7 倍于结构屈服应力的正常固结范围内, 原状土样在不同固结压力下表现出与重塑土样不同的有效应力路径、极限状态线、有效内摩擦角和强度比. 当固结压力较小时, 原状土样表现出比重塑土样明显偏大的 ACUE 强度, 因而呈现出较小的强度各向异性; 随着固结压力的增大及结构进一步破损, 原状土样的强度各向异性逐渐增大而接近重塑土. 因此, 在对 K_0 正常固结软黏土的三轴强度比及其各向异性的研究中, 这种与固结压力相关的结构效应值得关注. 直剪快剪试验结果表明, 正常固结范围内两种 K_0 固结土样的强度比几乎相同, 因而可以忽略结构效应对直剪快剪强度的影响.

关键词: 软黏土; 结构效应; 强度比; 三轴试验; 强度各向异性

中图分类号: TU411

文献标志码: A

Normalized Strength and Strength Anisotropy of Two K₀ Consolidated Specimens

GAO Yanbin

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: K_0 consolidation (confined consolidation) can induce soil anisotropy. To investigate the effects of structures on the normalized undrained strength and strength anisotropy of K_0 normally consolidated soil, triaxial ACUC (K_0 consolidated compression), ACUE (K_0 consolidated extension) tests and direct shear tests were conducted on natural specimens and remolded specimens of Shanghai soft clay. It was found that in the triaxial ACUC and ACUE tests, in the range of consolidation pressure of up to 3.7 times structure

yield stress, because of structure effect, the natural specimens have different effective stress paths, ultimate strength line, effective internal friction angle, and normalized strength with the remolded specimens. When consolidation pressure is small, the natural specimens have a larger ACUE strength and therefore, a smaller strength anisotropy than the remolded specimens. With the increase of consolidation pressure and structure damage, the strength anisotropy of natural specimens increases gradually and approaches the strength anisotropy of remolded specimens. Therefore, in the research of the normalized ACUC, ACUE strength, and strength anisotropy of natural soft clay, structure effect should be taken into considered. Moreover, it is found that the two kinds of specimen have almost the same normalized direct shear strength, therefore the effects of structures on direct shear strength can be neglected.

Key words: soft soil; structure effect; normalized strength; triaxial test; strength anisotropy

软黏土的不排水抗剪强度 c_u/σ'_{vc} 是评价软土强度以及软土地基稳定性验算中采用的一个重要指标, 其中 c_u 为不排水抗剪强度, σ'_{vc} 为竖向有效固结压力. 研究表明, K_0 固结(侧向约束的固结)软黏土的强度比具有明显的各向异性, 三轴 ACUC(K_0 固结压缩、竖向加载)试验得到的强度比要明显大于 ACUE(K_0 固结拉伸、侧向加载)试验得到的强度, 而直剪试验或单剪试验得到的强度比则介于二者之间. 这种强度各向异性在软黏土地基稳定性分析中应予以充分考虑^[1-3].

在 K_0 正常固结软黏土的强度比及其各向异性的试验研究中, 采用的土样通常有原状土样和重塑土样两种. 长期以来的研究重点集中在不同试验(室内三轴、直剪、单剪以及原位十字板)测得的强度比与土的塑性指数 I_P (代表土的物质成分)的关系^[1-6].

收稿日期: 2018-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(40702051)

第一作者: 高彦斌(1973—), 男, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为软土力学特性与软土工程.

E-mail: yanbin_gao@tongji.edu.cn

人们普遍接受的结论是, ACUC 强度比随 I_P 变化不大, 但 ACUE 强度比随 I_P 的增大而增大, 从而导致强度各向异性随着 I_P 的增大而减小. 然而也有不同的意见, Hanzawa 等^[7]、Shogaki 等^[8]认为, K_0 正常固结软黏土的强度比与 I_P 的相关性不明显. Won^[9]专门统计了 14 个国家 203 组原状黏性土的试验数据, 发现原状黏性土的强度各向异性与 I_P 的相关性并不明显; Won 还发现 ACUE 强度的取值标准会对强度各向异性统计结果产生显著影响.

原状软土通常具有非稳定的絮凝结构 (flocculated structure), 而重塑土样具有稳定的分散结构 (dispersed structure)^[10]. 由于结构效应, 两种土样在正常固结和超固结范围内的变形和强度会有明显差别并受到广泛关注^[11-13]. 但在 K_0 正常固结软黏土的强度比及其各向异性的研究中, 这种效应常被忽略, 在相关试验结果的统计发现研究中, 多数并不刻意区分这两种土样. 而上面提到的研究结果不一致的现象, 在某种程度上可能是由于土样的结构效应造成的.

上海软黏土具有一定的结构性, 灵敏度在 4~6 左右. 一些学者曾对上海软黏土强度各向异性的特征进行研究, 包括采用异形十字板方法^[14]、不同切土方向的常规三轴试验^[15]以及三轴 ACUC 和 ACUE 试验^[16]. 本文的目的是通过对比上海软黏土的原状土样和重塑土样的三轴 ACUC 和 ACUE 试验以及直剪试验得到的强度比, 揭示这两种土样所具有的不同的结构性对强度比及其各向异性的影响规律.

1 土样制备和试验方案

1.1 土样制备

上海软黏土是地质上正常固结的海相沉积软土. 块状原状土样采自一地铁车站基坑深度 10 m 处, 采用 PVC 管人工采取, 尽量减少对土样的扰动. 原状土样的天然含水率 w_n 为 47%, 液限 w_L 为 47%, 塑限 w_P 为 18.7%, 塑性指数 I_P 为 23.9%. 采用无侧限抗压强度试验测得的灵敏度 S_t 为 5.3, 属于高灵敏性土. 压缩试验得到的前期固结压力或结构屈服应力 p_c 为 120 kPa, 是土样原位竖向有效自重应力 ($\sigma'_{v0} = 92$ kPa) 的 1.3 倍, 即超固结比为 1.3.

重塑土样由原状土样风干、碾碎、加水预压制成. 过筛的风干土与无气蒸馏水在 1.75 倍液限含水量状态下搅拌混合成泥浆, 然后倒入直径为 10 cm、高度为 20 cm 的不锈钢固结仪中, 在双面排水的状态下逐级施加 5、10、25、75 kPa 的固结压力, 每级荷载持续时间为 8 h, 最后一级荷载持续 7 d, 以保证土样充分固结. 然后脱模切取三轴试验用的圆柱状土样.

1.2 三轴 ACUC 和 ACUE 试验

三轴剪切试验方案见表 1. 原状土样分别进行 4 个不同固结压力下的 ACUC 和 ACUE 试验, 试验编号以 N 开头; 重塑土样分别进行 2 个不同压力等级下的 ACUC 和 ACUE 试验, 试验编号以 R 开头. 三轴试样侧面贴滤纸条以加速排水. 三轴剪切仪采用 GDS 牌应力路径三轴仪. 试验采用的反压为 150 kPa.

表 1 三轴 ACUC、ACUE 试验两种土样的固结压力和强度比

Tab.1 Consolidation and normalized strength of two kinds of specimens in ACUC and ACUE tests

试验类型	试样编号	固结应力及固结状态						强度比 c_u/σ'_{vc}
		固结状态	围压 σ'_{rc}/kPa	轴压 σ'_{vc}/kPa	平均有效应力 p'_c/kPa	偏应力 q_c/kPa	孔隙比 e	
ACUC	NAC1	超固结	55	109	73	54	1.260	0.37
	NAC2	正常固结	105	200	137	95	1.100	0.29(峰值 0.31)
	NAC3	正常固结	160	300	207	140	1.001	0.28(峰值 0.31)
	NAC4	正常固结	250	450	317	200	0.920	0.28(峰值 0.31)
	RAC1	正常固结	55	106	72	51	0.855	0.33
	RAC2	正常固结	127	248	167	121	0.765	0.32
ACUE	NAE1	超固结	60	112	77	52	1.254	0.25
	NAE2	正常固结	100	200	137	100	1.102	0.25
	NAE3	正常固结	160	300	207	140	1.000	0.23
	NAE4	正常固结	240	440	307	200	0.929	0.20
	RAE1	正常固结	50	95	64	45	0.868	0.20
	RAE2	正常固结	130	250	170	122	0.765	0.20

每个试验采用的固结压力见表 1, 包括围压 σ'_{rc} 、轴压 σ'_{vc} , 以及由此计算得到的固结状态的有效平均应力 p'_c 和偏应力 q_c , 即 $p'_c = (\sigma'_{ac} + 2\sigma'_{rc})/3$, $q_c = \sigma'_{ac} -$

σ'_{rc} . 对于原状土样, 土样 NCAC1 和 NCAE1 的固结压力接近原位应力, 但小于结构屈服应力 p_c (即 120 kPa), 因而处于超固结状态; 其余 3 个土样的固结压

力均大于其结构屈服应力 p_c (即 120 kPa), 而处于正常固结状态. 原状土样采用的最大竖向固结压力 σ'_{vc} 为 450 kPa, 约为原位应力 σ'_{vo} 的 4.8 倍, 结构屈服应力 p_c 的 3.7 倍. 重塑土样的竖向固结压力 σ'_{vc} 均远大于制样时采用的最大固结压力 (75 kPa), 因而均处于正常固结状态. 土样在三轴仪中固结过程如下: 反压饱和后, 在排水状态下保持围压 σ'_r 和轴压 σ'_v 的比值 $\sigma'_r/\sigma'_v=0.5$ 缓慢施加围压和轴压, 直至达到表 1 中给出的固结压力, 这个匀速加载阶段约为 40 h; 然后在恒定荷载下再固结 8 h. 采用此加载方法的固结过程中的径向应变非常小, 与侧限条件下的 K_0 固结基本等效. 固结结束后, 土样在不排水状态下剪切至破坏. ACUC 剪切采用恒定的轴向位移速率, 约为 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; ACUE 剪切采用恒定的围压加载速率, 剪切阶段总时间大约在 8 h.

除了以上两种三轴试验外, 还进行了直剪固结快剪试验. 剪切速率为 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. 直剪试验中土样的破坏面为水平向, 与三轴试验不同.

1.3 土样固结状态

三轴 ACUE 试验中土样的固结状态与 ACUC 试验的差别不大. 图 1 给出了三轴 ACUC 试验中两种土样固结后孔隙比 e 与有效平均应力 p' 的关系, 其中, $p'=(\sigma_a+2\sigma'_r)/3$, 以及一维压缩试验得到的压缩曲线 $K_0\text{CL}$. 可以看出, 三轴试验中土样的固结状态与 $K_0\text{CL}$ 线较为吻合, 表明采用的固结方法接近 K_0 固结状态. 从图 1 可以看出, 原状土样在超过结构屈服压力的正常固结状态, 压缩曲线的斜率变陡而逐渐向重塑土的压缩曲线靠近. 原状土样和重塑土样正常固结阶段内压缩曲线斜率(即压缩指数 C_c)的平均值分别为 0.50 和 0.25.

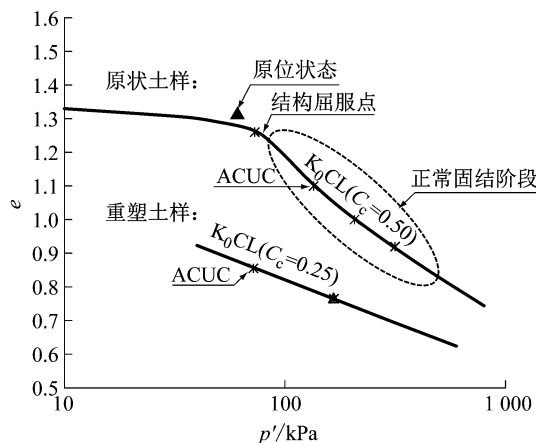
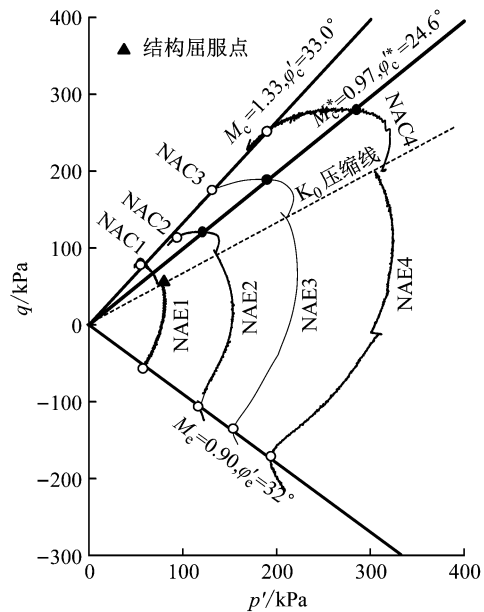


图 1 三轴试验中两种土样的固结状态 (ACUC 试验)
Fig.1 Consolidation states for natural and remolded specimens in ACUC test

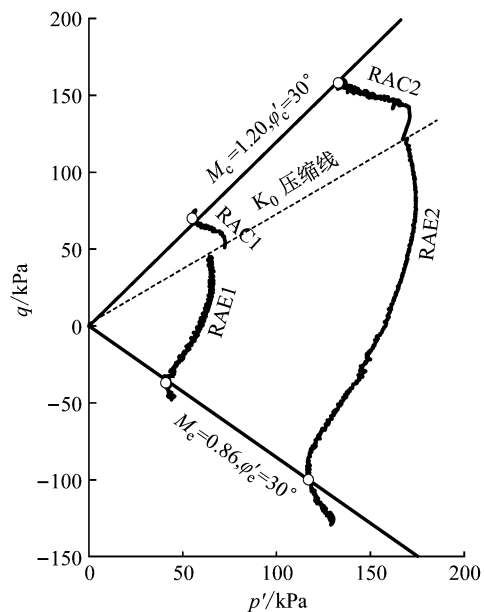
2 三轴试验和直剪试验结果

2.1 三轴试验有效应力路径和有效内摩擦角

图 2 给出了三轴 ACUC 和 ACUE 试验得到的两种土样在 $q-p'$ 空间中的有效应力路径. 这里将剪切破坏阶段有效应力路径发生明显转折的点作为极限状态 (空心圆点), 对应的强度称为极限强度, 对应的轴向应变约为 10%. 由于各向异性的影响, 两种土



a 原状土样



b 重塑土样

图 2 两种土样的三轴试验有效应力路径
Fig.2 Effective stress paths in ACUC and ACUE tests for natural specimens and remolded specimens

样的有效应力路径并不关于 p' 轴对称, ACUC 得到的强度要明显小于 ACUC 试验得到的强度. 只有在原状土的 ACUC 试验中出现软化现象和峰值强度 (实心圆点), 对应的轴向应变约为 1%.

从图 2a 可以看出, 在 ACUC 试验中, 3 个处于正常固结阶段内的原状土样(NAC2、NAC3、NAC4)的有效应力路径与处于超固结阶段的土样(NAC1)有明显的不同. 3 个土样的峰值强度和极限强度在 $q-p'$ 空间几乎位于同一条直线上, 分别被称为峰值强度线和极限强度线, 其斜率分别用 M_c^* 和 M_c 表示. 原状土样的 M_c^* 和 M_c 分别为 0.97 和 1.33, 根据式 $M_c = 6 \sin \varphi'_c / (3 - \sin \varphi'_c)$ 得到的内摩擦角 φ'_c 分别为 24.6° 和 33.0° . 从图 2b 可以看出, 重塑土的 ACUC 有效应力路径形态与原状土有很大的不同, 并未表现出软化现象, 试验得到的 M_c 为 1.20, φ'_c 为 30° . 说明原状土在 ACUC 试验中所表现出来的峰值强度现象是由于结构的非稳定性造成的, 而不是由于各向异性造成的.

从图 2a 和 2b 中可以看出, 三轴 ACUC 试验中两种土样的有效应力路径形态相似, 但形状并不完全相同. 两种土样均未表现出软化现象, 原状土样和重塑土样的极限强度线的斜率 M_c 分别为 0.90 和 0.86. 按照 $M_c = 6 \sin \varphi'_e / (3 - \sin \varphi'_e)$ 求得的有效内摩擦角 φ'_e 分别为 32° 和 30° , 原状土样的内摩擦角比重塑土样的约大 2° . 综上所述, 在极限状态, 由于结构性的影响, 原状土样的内摩擦角比重塑土样的大 $2^\circ \sim 3^\circ$. 无论原状土样还是重塑土样, 可以近似认为在极限状态存在 $\varphi'_e \approx \varphi'_c$.

试验得到的每个土样的强度比 c_u/σ'_{vc} 见表 1. 原状土样给出的两个 ACUC 强度分别对应峰值强度和极限强度.

2.2 孔隙比和有效平均应力空间中的极限状态线

图 3 给出了两种土样的极限状态线在孔隙比 e 和有效平均应力 p' 空间内的位置. 可以看出, 两种土样的极限状态线有明显的差别, 原状土的极限状态线位于重塑土之上. 这表明即使在极限状态, 两种土样的结构仍然差别较大. 另外, 两种试验中重塑土样似乎具有唯一的极限状态线, 表明试验过程中的剪缩相同. 原状土样的极限状态与试验方式有关, ACUC 试验的极限状态线位于 ACUC 之上, 表明 ACUC 试验中的剪缩现象要小于 ACUC 试验. 可见, 两种土样所具有的不同结构性对剪缩特性以及极限状态的位置有明显影响, 这也是两种土样表现出不同强度特性的本质原因.

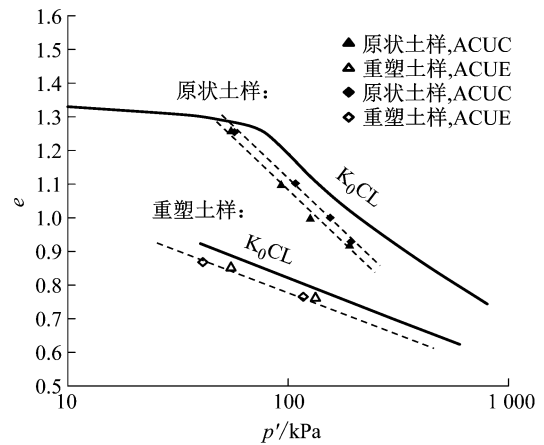


图 3 两种土样在 $e-\lg p'$ 中的极限状态
Fig.3 Ultimate state in $e-\lg p'$ space

2.3 直剪试验结果

直剪试验中土样的破坏面在水平方向而不是一个倾斜方向. 试验结果表明, 两种土样均未出现明显软化现象, 均在约 1 mm 剪切位移时破坏. 图 4 给出了固结快剪试验得到的两种土样的强度与竖向固结压力 σ'_{vc} 的关系曲线, 以及内聚力 c_q 和内摩擦角 φ_q 的数值. 可以看出, 在竖向固结压力较大 ($\sigma'_{vc} > 120$ kPa) 的正常固结状态, 两种土样的强度曲线几乎重合. 表明结构性不会对直剪快剪强度产生显著影响. 根据图 4 给出的直剪快剪试验的强度线得到的强度比 $(c_u/\sigma'_{vc})_{DS}$ 约为 0.26. 之后又进行了一组固结慢剪试验, 剪切速率为 $0.02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 慢速剪切, 试验得到的强度曲线及强度参数 c_s 和 φ_s 见图 4, 同样发现结构性对直剪慢剪强度没有显著影响.

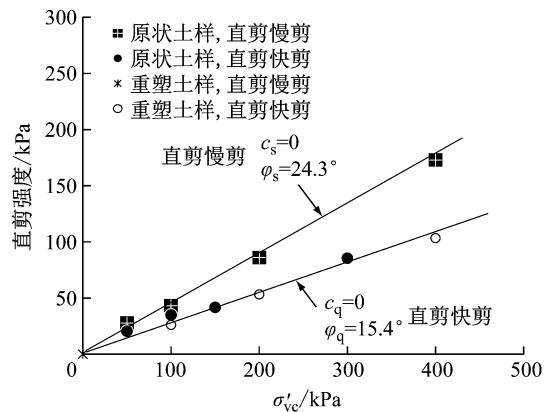


图 4 两种土样的直剪快剪、慢剪试验强度曲线
Fig.4 Direct shear strength of two kinds of specimens

3 两种土样的强度比对比

3.1 强度比与固结应力的关系

图 5 绘制出了表 1 中给出的强度比 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUC}$

和 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUC}$ 与竖向固结应力 σ'_{vc} 和原位竖向有效固结应力 σ'_{vc0} ($=92$ kPa) 的比值之间的关系. 对于重塑土样, 各土样均处于正常固结状态, $\sigma'_{vc}/\sigma'_{vc0} = 1$, $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUC} = 0.33$, $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUE} = 0.20$. 对于原状土样, 当土样处于超固结状态时 (试样 NAC1 和 NAE1), 得到的 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUC}$ 和 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUE}$ 均比重塑土样大一些. 随着固结应力 σ'_{vc} 的增大, 土样逐渐进入正常固结阶段, $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUC}$ 和 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUE}$ 的变化呈现出两种不同的规律: 对于 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUC}$, 原状土样的峰值强度和极限强度迅速降低到一个稳定的值, 分别为 0.31 和 0.28, 比重塑土的 0.33 略低; $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUE}$ 则随着固结应力的增大而缓慢持续减小, 最终与重塑土的相差不大. 以上试验结果说明, 原状土样的结构性不仅对超固结阶段的强度比有影响, 对正常固结阶段内的 ACUC 和 ACUE 强度也均有影响, 而且对 ACUC 和 ACUE 强度的影响规律是不同的.

图 5 还给出了直剪快剪试验得到的强度比 $(c_u/\sigma'_{vc})_{DS}$ 作为对比. 对于重塑土样, $(c_u/\sigma'_{vc})_{DS}$ 与 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUC}$ 和 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUE}$ 的平均值几乎一致, 即 $(c_u/\sigma'_{vc})_{DS} = [(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUC} + (c_u/\sigma'_{vc})_{ACUE}]/2 = (0.33 + 0.20) = 0.26$. 这与 Hanzawa 等^[7] 得到的结论是一致的. 但对于原状土样, 尽管在正常固结阶段内 $(c_u/\sigma'_{vc})_{DS}$ 和 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUC}$ 是基本恒定的, 但由于 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUE}$ 随着固结压力的增大而有较大的变化, 因此上述关系并不存在. 原状土的 $(c_u/\sigma'_{vc})_{DS}$ 既可能比 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUC}$ 和 $(c_u/\sigma'_{vc})_{ACUE}$ 的平均值大, 也可能比其小.

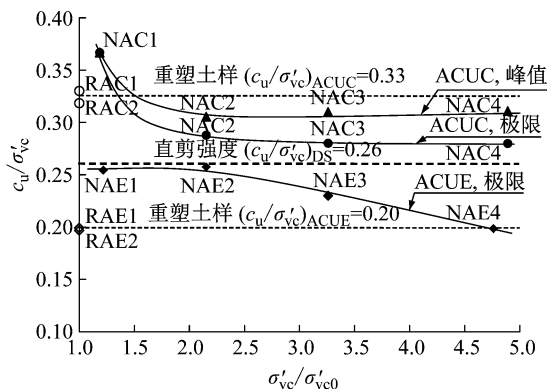


图 5 两种土样的强度比

Fig.5 Normalized strengths of two kinds of specimens

3.2 与文献[2]统计结果的对比

Ladd^[2] 收集了大量资料, 给出了图 6 所示的 3 种试验 (三轴 ACUC、ACUE 试验和单剪试验) 得到的 K_0 正常固结黏性土的强度比与土的塑性指数 I_p

之间的关系曲线. 其中, 所有的强度均取峰值强度, 在没有峰值强度的情况下, 取较大应变下的强度. 图 6 给出了本文试验结果与文献[2]给出的强度线的对比. 可以看出, 重塑土样的 ACUC 和 ACUE 强度与文献[2]给出的强度曲线均差别不大. 对于正常固结阶段内原状土 ACUC 峰值强度, 3 个土样 (NAC2、NAC3、NAC4) 的强度均比文献[2]给出的结果略低. 而对于正常固结阶段内原状土 ACUE 强度, 两个土样 (NAE2 和 NAE3) 的强度要明显大于文献[2]给出的结果, 只有在固结压力高达 4.5 倍原位应力的情况下的土样 NAE4 的强度接近文献[2]的结果. 这些差别应该是由于原状土样的结构造成的.

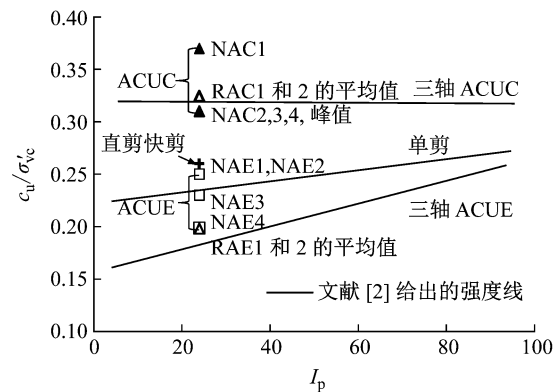


图 6 与文献[2]给出的强度曲线的对比

Fig.6 Comparison of test results with Ladd's strength lines

3.3 强度各向异性

ACUE 强度与 ACUC 强度的比值, 即 $c_{u(ACUE)}/c_{u(ACUC)}$, 能够被用来评价 K_0 固结土的强度的各向异性的大小. 由于 ACUE 强度比 ACUC 强度小, 所以这个参数小于 1.0; 比值越小, 代表强度各向异性程度越大. 从图 6 可以看出, 强度各向异性随着 I_p 的增大而减小. 图 7 给出了两种土样的强度比 $c_{u(ACUE)}/c_{u(ACUC)}$ 与固结应力比 $\sigma'_{vc}/\sigma'_{vc0}$ 之间的关系. 原状土样给出的两个结果分别对应 $c_{u(ACUC)}$ 取峰值强度和极限强度两种情况. 重塑土的强度比 $c_{u(ACUE)}/c_{u(ACUC)}$ 为 0.61. 原状土样总体上比重塑土样具有较大的强度比, 也就是较弱的强度各向异性. 原状土的强度比 $c_{u(ACUE)}/c_{u(ACUC)}$ 明显受固结应力大小的影响, 在正常固结阶段内, 强度比随着固结压力的增大逐渐减小, 表明强度各向异性程度由弱变强, 最终接近重塑土样. 原状土和重塑土所表现出来的不同程度的各向异性显然也是受结构的影响.

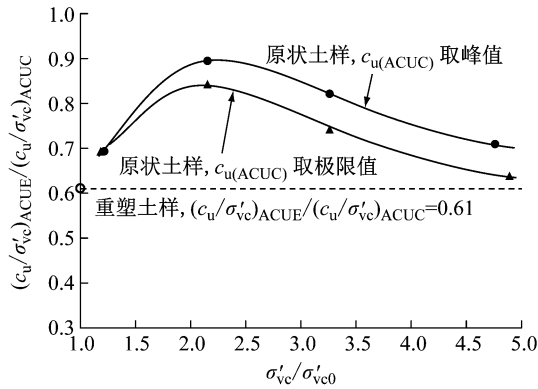


图7 两种土样的强度各向异性

Fig.7 Strength anisotropy of two kinds of specimens

4 结论

对上海软黏土的原状土样和重塑土样进行的三轴 ACUC、ACUE 试验以及直剪试验结果表明:在 $\sigma'_{vc} = (1 \sim 3.7) p_c$ 的正常固结阶段内,原状土样所具有的非稳定的结构以及在固结和剪切过程中结构破损,使其在三轴 ACUC、ACUE 试验中表现出与重塑土样不同的有效应力路径、极限状态线的位置、有效内摩擦角和强度比.原状土所具有的结构性使其在三轴 ACUC 试验中表现出软化现象,且强度比略低于重塑土样的强度;ACUE 试验中则表现出比重塑土样较大的强度,且随着固结压力的增大而逐渐减小.但试验结果表明,结构性对这两种土样的直剪快剪强度却几乎没有影响.原状土样的结构性导致其在 ACUE 试验中的剪缩现象较小而强度比较大,因而强度各向异性程度较小.但随着固结压力的增大,原状土的强度各向异性表现出逐渐增大的规律.

因此可以认为, K_0 固结软黏土的强度比及其各向异性应该不仅与土的物质成分有关,还与土的结构性有关.而原状土的结构性不仅与初始结构特征有关,还和固结压力的不同造成的破损程度有关,这加剧了原状土强度各向异性的复杂性.这在一定程度上能够解释以往研究中发现的原状黏性土的强度各向异性与塑性指标 I_p 指标间相关性不明显的现象.在对软黏土 ACUC 和 ACUE 强度比及其各向异性特性试验研究与统计分析研究中,有必要区分这两种土样的类型以及试验采用的固结压力的范围.当然,这种结构性对软黏土强度及其强度各向异性的影响规律可能也与结构性的强弱有关,本文给出的规律是否适用于结构性更强的软黏土(如灵敏度

达到几十的 quick clay),还需要进一步验证.

参考文献:

- [1] BJERRUM L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays [C] // Proc 8th ICSMFE. Moscow: USSR, 1973: 111-159.
- [2] LADD C C. Stability evaluation during staged construction[J]. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117(4):537.
- [3] SU S, LIAO H. Effect of strength anisotropy on undrained slope stability in clay[J]. Geotechnique, 1999, 49(2):215.
- [4] SKEMPTON A W. Vane tests in the alluvial plain of the River Forth near Grangemouth[J]. Géotechnique, 1948, 1: 111.
- [5] LADD C C, FOOT R, ISHIHARA K, *et al.* Stress-deformation and strength characteristics: state-of-the-art report [C] // Proc 9th ICSMFE. Tokyo: JSSMFE, 1977: 421-494.
- [6] MESRI G. A reevaluation of $s_u(\text{mob}) = 0.22\sigma' p$ using laboratory shear test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(1):162.
- [7] HANZAWA H, TANAKA H. Normalized undrained strength of clay in the normally consolidated state and in the field[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(1):132.
- [8] SHOGAKI T, KUMAGAI N. A slope stability analysis considering undrained strength anisotropy of natural clay deposit[J]. Soils and Foundations, 2008, 48(6):805.
- [9] WON J Y. Anisotropic strength ratio and plasticity index of natural clays [C] // Proc 18th ICSMFE. Paris: Presses des Ponts, 2013: 445-448.
- [10] MITCHELL J K. Fundamentals of soil behavior[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2005.
- [11] LEROUEIL S, TAVENAS F, BRUCY F, *et al.* Behaviour of destructured natural clay[J]. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, 105(GT6):759.
- [12] BURLAND J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Geotechnique, 1990, 40(3):329.
- [13] LEROUEIL S. Critical state soil mechanics and the behaviour of real soils[C]//Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. Rotterdam: Balkema, 1997:41-80.
- [14] 高彦斌,楼康明.上海软黏土强度固有各向异性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(11):1658.
GAO Yanbin, LOU Kangming. Strength anisotropy of Shanghai soft clay induced by inherent fabric[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2013, 41(11):1658.
- [15] 袁聚云.软土各向异性性状的试验研究及其在工程中的应用[D].上海:同济大学,1995.
YUAN Juyun. Experimental studies on anisotropic behavior of soft clays and its engineering application [D]. Shanghai: Tongji University, 1995.
- [16] 杨熙章.土工试验与原理[M].上海:同济大学出版社,1993.
YANG Xizhang. Principals of soil laboratory test [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1993.