

文章编号:1671-1637(2015)03-0027-07

# 主应力轴旋转下中主应力系数对软黏土性状的影响

柳艳华, 谢永利

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**采用空心圆柱仪对上海原状软黏土进行了不排水剪切试验,研究了主应力轴旋转条件下中主应力系数对饱和软黏土变形与强度特性的影响。采用等压固结模式对软黏土空心薄壁试样进行固结,并在3种不同主应力轴旋转角度下,对试样进行不同中主应力系数的不排水剪切试验。试验前提为剪切过程中平均应力、中主应力系数与主应力轴旋转角度均保持不变,而偏应力逐渐增大,直至试样破坏。试验结果表明:在不同中主应力系数下,天然软黏土的变形与强度特征存在明显的差异,在3种主应力轴旋转角度下,随着中主应力系数的增加,临界应力比均呈降低趋势,相应的峰值剪切强度减小;在主应力轴旋转角度为 $0^\circ$ 时,中主应力系数为0.25和0.50的试样均出现了轻微的应变局部化现象,剪应力在达到峰值后呈逐渐降低的趋势;在主应力轴旋转角度为 $90^\circ$ 时,中主应力系数为0.50和0.75的试样所对应的状态为内外压不等的非轴对称拉伸状态,二者的峰值剪切强度比较接近,而中主应力系数为1.00的试样对应的为内外压相等的轴对称拉伸状态,其峰值剪切强度相比前二者降低了25%;在内外压相等的加载条件下,主应力轴旋转角度由 $0^\circ$ 增加为 $90^\circ$ 的同时,中主应力系数由0增加为1.00,试样破坏时对应的临界应力比与不排水剪切强度均逐渐降低。

**关键词:**路基工程;软黏土;空心圆柱仪;中主应力系数;主应力轴旋转;应力与应变关系;峰值剪切强度  
**中图分类号:**U416 **文献标志码:**A

## Influence of intermediate principal stress coefficient on character of soft clay under rotation of principal stress axes

LIU Yan-hua, XIE Yong-li

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** A series of undrained shear tests were carried out on Shanghai undisturbed soft clay by using hollow cylinder apparatus. Under the rotation of principal stress axes, the influence of intermediate principal stress coefficient on the deformation and strength character of saturated soft clay was researched. The hollow thin-walled samples of soft clay were consolidated under isotropic consolidation modes. Under 3 kinds of rotation angles of principal stress axes, a series of undrained shear tests were carried out with different intermediate principal stress coefficients. During the shear tests, the deviator stress increased until the sample was destroyed, while average stress, intermediate principal stress coefficient and the rotation angle of principal stress axes remained unchanged. Test result indicates that the deformation behavior and strength character of natural soft clay were obviously different under different intermediate principal stress coefficients. The critical stress ratio and undrained shear strength decrease with the increase of

收稿日期:2015-01-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51208055);中国博士后科学基金项目(2012M511960);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310821151011)

作者简介:柳艳华(1981-),女,内蒙古赤峰人,长安大学讲师,工学博士,从事岩土工程研究。

intermediate principal stress coefficient under the three kinds of rotation angles of principal stress axes. When the rotation angle of principal stress axes is  $0^\circ$ , the shear stresses of samples with the intermediate principal stress coefficients of 0.25 and 0.50 decrease after arriving the peak values because of slight strain localization. When the rotation angle of principal stress axes is  $90^\circ$ , and intermediate principal stress coefficients are 0.50 and 0.75, the peak values of shear strength are similar, and the sample states are non-axisymmetrical tensile with unequal inner and outer pressure. Moreover, when the intermediate principal stress coefficient is 1.00, comparing with the coefficients of 0.50 and 0.75, the peak shear strength decreases by 25%, and the sample states are axisymmetrical tensile with equal inner and outer pressure. If the equal internal and external pressures are applied, when the rotation angle of principal stress axes increase from  $0^\circ$  to  $90^\circ$ , the intermediate principal stress coefficient increase from 0 to 1.00, and the critical stress ratio of samples and undrained shear strength decrease. 2 tabs, 8 figs, 20 refs.

**Key words:** subgrade engineering; soft clay; hollow cylinder apparatus; intermediate principal stress coefficient; rotation of principal stress axes; stress-strain relationship; peak shear strength

**Author resume:** LIU Yan-hua(1981-), female, lecturer, PhD, +86-29-82332387, yanhua3537@126.com.

## 0 引 言

近年来,关于主应力轴旋转对各类土木工程的影响已经得到充分的关注。Zdravković等指出在土石坝蓄水与基坑开挖等工程活动中,主应力轴会发生显著的偏转<sup>[1]</sup>;沈扬等指出在某些复杂循环荷载作用下,地基土中的主应力轴会发生循环旋转,可能对地基土的性质产生较大影响<sup>[2]</sup>。

试验研究是认识和掌握土体基本特性的主要途径,在过去的几十年,大量的土工试验研究都集中在三轴空间内<sup>[3]</sup>,对于主应力轴旋转问题研究较少。20世纪80年代,Hight等研发了空心圆柱仪(Hollow Cylinder Apparatus, HCA),不但可以实现主应力大小的任意变化,还可以同时实现主应力方向的随意变化,目前已经成为研究主应力轴旋转问题的首选方法<sup>[4]</sup>。沈瑞福等利用改进的共振柱/动扭剪仪,对砂土进行主应力轴旋转和常规动扭剪的对比试验,结论为在考虑主应力轴旋转的前提下,砂土的动强度降低15%左右<sup>[5]</sup>;Hong等对重塑的非等向固结EPK黏土进行了排水和不排水条件下主应力轴旋转试验,结果表明试样破坏时的应力比与剪切强度存在差异<sup>[6]</sup>;Albert等对取自不同深度的天然Bothkennar软黏土进行不排水条件下的扭剪试验与三轴压缩和拉伸试验,结果表明扭剪条件下的不排水强度介于三轴压缩和拉伸强度之间;Lin等对高岭土进行了不排水条件下的主应力轴旋转试验,结果表明试样的不排水抗剪强度和超孔隙水压力随

着主应力轴旋转角度的增加而逐渐降低<sup>[7]</sup>。在利用空心圆柱仪进行的各种研究中,存在一个共同的问题,即由于仪器加载能力的限制,试验过程中的内外压力只能相同,不能单独进行调控,因此,试验结果耦合了中主应力系数与主应力轴旋转角度两方面的影响。

在试验过程中能够对内外压力进行独立控制的前提下,Kandasami等以粒状砂土为研究对象,在排水条件下研究了中主应力系数对其力学行为的影响<sup>[8]</sup>;Zdravković等分析了各种非等向固结混合重塑材料的主应力轴旋转效应<sup>[9-11]</sup>;Minh等以天然超固结London黏土为研究对象,在中主应力系数恒定的情况下,研究了主应力轴旋转角度对小应变时的刚度模量与应力应变关系的影响<sup>[12-13]</sup>;聂影等研究了主应力轴旋转下饱和黏土的动力特性<sup>[14]</sup>;沈扬等在中主应力系数为0和0.5情况下,研究了复杂加载应力路径对软黏土的强度、剪切带性状、孔压特征与应力应变特性的影响<sup>[15-16]</sup>,但未对中主应力系数进行系统研究,总体侧重于各种复杂加载应力路径的影响;管林波等从各向异性的角度研究了中主应力系数为0和0.5的情况下,主应力作用方向不同时黏土试样各向异性的特点<sup>[17]</sup>,由于研究从各向异性角度出发,故仅选择中主应力系数为0(原状黏土具横观各向同性)与0.5(原状黏土不具横观各向同性)2种情况进行对比,并未涉及中主应力系数为其他更广泛值的情况;严佳佳等在平均应力和剪应力固定,而主应力轴发生 $0^\circ\sim 360^\circ$ 纯旋转情况下,研

究了塑性应变增量方向与主应力方向之间的关系(塑性流动特性)<sup>[18]</sup>,虽然考虑了不同中主应力系数的影响,但是试验的前提为主应力轴同时发生纯旋转,而非主应力轴固定为某个角度;周建等在中主应力系数为 0.5 的情况下,研究了不同切应力水平下,软黏土各应变分量、广义切应变与切变模量随主应力轴旋转角度的变化情况<sup>[19]</sup>,但研究仅考虑了主应力轴旋转对软黏土应变的影响,并未涉及不同中主应力系数的对比研究。

综上所述,目前研究多侧重于主应力轴旋转对于各类土性质的影响,对于主应力轴旋转角度固定的情况下,将中主应力系数作为单一变量,系统研究其对于各类土,尤其是原状软黏土性质的影响则相对较少。为此,本文针对典型原状软黏土展开不排水条件下的空心圆柱扭剪试验,研究饱和和软黏土应力-应变关系与峰值剪切强度随中主应力系数的变化情况。

## 1 试验概况

### 1.1 试验仪器

图 1 为试验采用的空心圆柱仪。对于空心试样而言,空心圆柱仪的加载参数分别为内压  $p_i$ 、外压  $p_o$ 、轴力  $F$  与扭矩  $T$ ,这 4 个加载参数在空心薄壁样品上引起 4 个应力分量,分别为  $\sigma_a$ 、 $\sigma_c$ 、 $\sigma_r$ 、 $\tau$ ,见图 2,其中轴向应力  $\sigma_a$  由轴力  $F$  产生,环向应力  $\sigma_c$ 、径向应力  $\sigma_r$  由样品上施加的内外压  $p_i$ 、 $p_o$  产生,扭剪应力  $\tau$  由在样品上施加的扭矩  $T$  产生, $\sigma_1 \sim \sigma_3$  分别为大主应力、中主应力、小主应力。试验所用的空心圆



图 1 空心圆柱仪

Fig. 1 Hollow cylinder apparatus

柱仪之所以能够实现平面主应力轴的旋转,原因在于试验时,可以对内压、外压、轴力与扭矩 4 个加载参数进行单独调控。

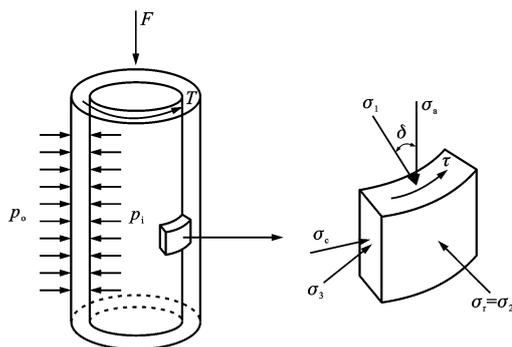


图 2 试样受力

Fig. 2 Forces of sample

在实际工程应用中,空心圆柱仪的 4 个传统应力分量  $\sigma_a$ 、 $\sigma_c$ 、 $\sigma_r$ 、 $\tau$  应用较少,应用较为广泛的是由大主应力  $\sigma_1$ 、中主应力  $\sigma_2$ 、小主应力  $\sigma_3$  与主应力轴旋转角度  $\delta$  组成的坐标系,这组应力坐标系与空心圆柱仪的 4 个传统应力分量存在固定的转换关系。由于 3 个主应力也可用总平均应力  $p$ 、偏应力  $q$ 、中主应力系数  $b$  表示,因而空心圆柱仪中土单元体的应力状态也可表示为  $p$ 、 $q$ 、 $b$ 、 $\delta$ 。空心薄壁单元体上 3 种应力坐标的转换关系为

$$\begin{cases} p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(\sigma_a + \sigma_r + \sigma_c) \\ q = \sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{(\sigma_a - \sigma_c)^2 + 4\tau^2} \\ b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \left[ \sigma_r - (\sigma_a - \sigma_c)/2 + \sqrt{(\sigma_a - \sigma_c)^2/4 + 4\tau^2} \right] \cdot \frac{1}{2} [(\sigma_a - \sigma_c)^2/4 + 4\tau^2]^{-1/2} \\ \delta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\tau}{\sigma_a - \sigma_c}\right) \end{cases} \quad (1)$$

试验时可以选择式(1)中 3 种应力坐标系中的任意一组进行调控,实现某种即定路径下的主应力轴旋转试验。本文对空心样品进行加载时,选择了  $p$ 、 $q$ 、 $b$ 、 $\delta$  应力系统,在试验时可以对上述 4 个分量进行独立操控。

### 1.2 试验土样

试验土样为上海典型原状淤泥质黏土,其基本物理特性见表 1。原状软黏土空心试样的制备一直是个难点,在试验时,采用特制的内外壁切土器,将土样制备成高度为 200 mm、外径为 100 mm、内径为 60 mm 的空心试样。图 3 为内壁切削好后的空心圆柱薄壁试样与橡皮试样的对比。

表 1 测试软黏土的基本物理特性

Tab. 1 Basic physical properties of tested soft clay

天然含水率/%	液限/%	塑限/%	液性指数	塑性指数	孔隙比	土粒相对密度	静止侧压力系数	超固结比
52.7	45.5	23.6	1.33	21.9	1.413	2.75	0.6	1.0

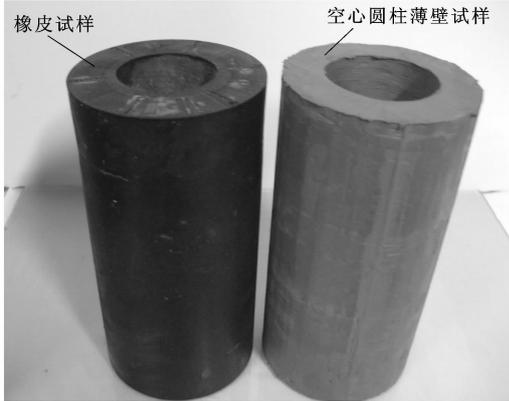


图 3 样品对比

Fig. 3 Sample comparison

1.3 试验方案

试验方案见表 2,与之对应的分布效果见图 4。图 4 中空心圆点为偏压固结试验点,实心圆点为等压固结试验点,阴影区域为仪器加载限制区域。由于试验使用空心薄壁试样,在试验过程中,可以对样品分别施加内压与外压,当内外压相差较大时,样品上的应力与应变将很难均匀分布,影响测试结果的准确性。针对这一问题,Hight 等通过对空心试样的研究,认为当外压与内压的比值小于 0.9 或者大于 1.2 时,均会导致空心薄壁试样上应力与应变的不均匀分布,因而,建议在制定空心圆柱加载试验方案时,应保证  $p_o/p_i$  为 0.9~1.2<sup>[4,20]</sup>。

表 2 试验方案

Tab. 2 Test schemes

固结模式	偏压固结					等压固结									
	$b$					$b$									
	0.50					0.50									
$\delta/(^\circ)$	0	30	45	60	90	0	30	45	60	90					
固结模式	等压固结														
	$b$					$b$									
	0					1.00									
$\delta/(^\circ)$	0	30	45	45	60	90									
固结模式	等压固结														
	$\delta/(^\circ)$					$b$									
	0					45					90				
	0	0.25	0.50	0	0.50	1.00	0.50	0.75	1.00						

由试验方案可见,本文研究的层次可以分为 3 方面:通过对偏压固结与等压固结的对比,研究固结模式的影响;研究主应力轴旋转角度的影响,即在等压固结模式下,中主应力系数固定( $b$  为 0、0.50、

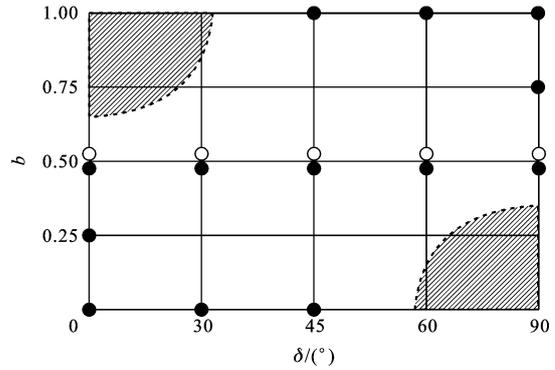


图 4 试验方案分布

Fig. 4 Distribution of test schemes

1.00),而主应力轴旋转角度不同;研究中主应力系数的影响,即在主应力轴旋转角度固定( $\delta$  为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ ),而中主应力系数取值不同,同时反映了在  $b = \sin^2(\delta)$  情况下软黏土的变形和强度性状。试验方案涵盖了仪器所能达到的区域,本次分析的重点为中主应力系数对软黏土应力、应变和峰值剪切强度的影响上。

1.4 试验过程

在试验时,先对空心圆柱试样进行有效平均应力  $p'$  为 150 kPa 的等压固结,固结时间为 48 h。剪切过程中采用应力控制模块,保持总平均应力、中主应力系数、主应力轴旋转角度不变,仅增加偏应力,剪切速率为  $1 \text{ kPa} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2 试验结果分析

由于本文的研究重点为中主应力系数的影响,即主应力轴旋转角度固定,而中主应力系数不同。为了便于对比,选择等压固结条件下,试验点超过 3 个点的纵线进行分析,即  $\delta$  分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  的 3 条纵线。此外  $b = \sin^2(\delta)$  系列为试验方案分布图 4 中的一条对角线,代表内外压相等的加载状态。

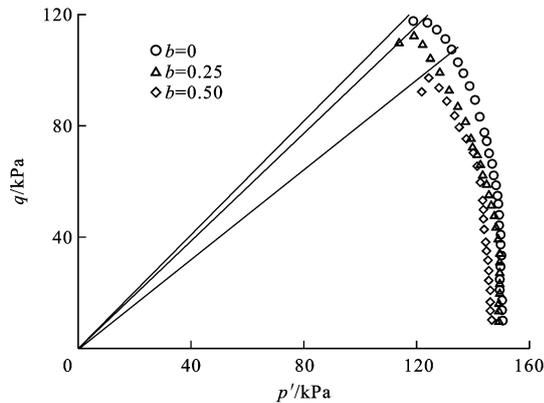
受空心圆柱仪加载系统的影响,其薄壁单元体上的应变包括轴向应变  $\epsilon_a$ 、径向应变  $\epsilon_r$ 、环向应变  $\epsilon_c$  与扭剪应变  $\gamma$ ,这 4 个应变分量与工程中常用的大主应变  $\epsilon_1$ 、中主应变  $\epsilon_2$ 、小主应变  $\epsilon_3$  的对应关系见式(2)。为了反映各个应变的综合影响,在应力-应变关系分析中采用广义剪应变  $\epsilon_s$ ,对应关系如下

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_c)^2 + \gamma^2} \\ \epsilon_2 = \epsilon_r \\ \epsilon_3 = \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(\epsilon_a - \epsilon_c)^2 + \gamma^2} \end{cases} \quad (2)$$

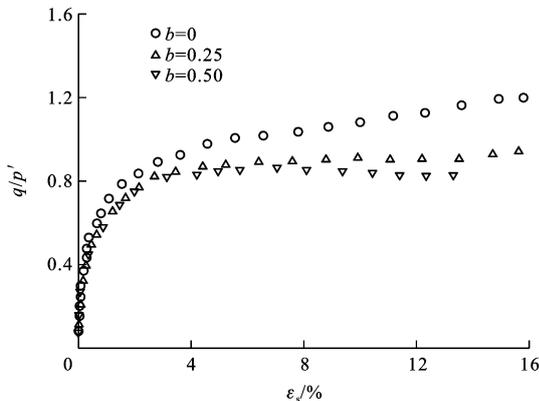
$$\epsilon_s = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (3)$$

### 2.1 $\delta$ 为 $0^\circ$ 系列

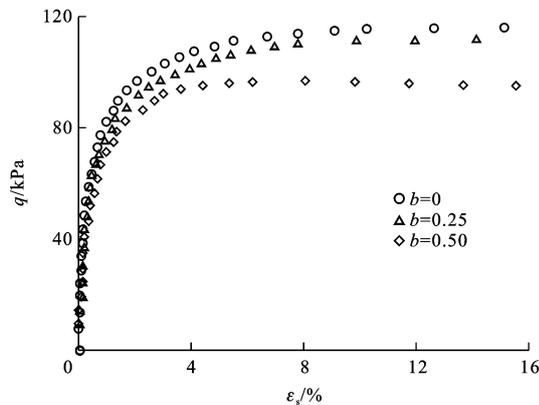
在等压固结模式下,主应力轴旋转角度为  $0^\circ$  时,不同中主应力系数对应的空心圆柱不排水剪切试验结果见图 5。由图 5 可以看出:中主应力系数对软黏土变形与强度特性均有一定的影响,随着中主应力系数的增加,临界应力比(临界状态线的斜率)逐渐减小,与之对应的峰值剪切强度减小;在不同中主应力系数下,随着广义剪应变的增大,应力比  $q/p'$  均逐渐增加;在低应变下,中主应力系数对应应力比的影响较小,随着应变的不断发展,不同中主应力



(a) 偏应力与有效平均应力关系曲线



(b) 应力比与广义剪应变关系曲线



(c) 偏应力与广义剪应变关系曲线

图 5  $\delta$  为  $0^\circ$  的试验结果

Fig. 5 Test results when  $\delta$  is  $0^\circ$

系数下,应力比的差异逐渐增大。此系列的前提条件为  $\delta=0^\circ$ ,即大主应力作用方向垂直于土体沉积面,当  $b$  为 0 时,  $\sigma_2=\sigma_3$ ,原状黏土沿沉积方向呈横观各向同性,土体在加载过程中呈轴对称压缩状态。当  $b$  分别为 0.25、0.50 时,  $\sigma_2 \neq \sigma_3$ ,原状黏土沿沉积方向均不具有横观各向同性,在加载过程中,土体一直处于非轴对称压缩状态。此外由图 5(a) 可以看出,由于  $b$  分别为 0.25、0.50 时试样出现了轻微的应变局部化现象,剪应力在达到峰值后呈逐渐降低的趋势。

### 2.2 $\delta$ 为 $45^\circ$ 系列

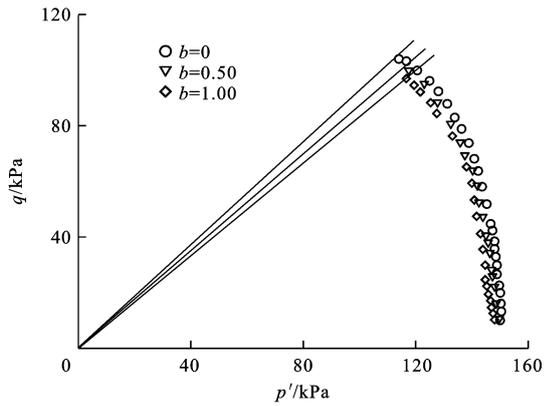
当主应力轴旋转角度为  $45^\circ$  时,空心圆柱不排水剪切试验结果见图 6。由图 6 可以看出:与  $\delta$  为  $0^\circ$  时类似,随着中主应力系数由 0 增加为 1.00,临界应力比逐渐降低,相应的峰值剪切强度减小,且相同剪应变所对应的应力比逐渐降低。与  $\delta$  为  $0^\circ$  系列相比,由于主应力方向发生偏转,即大主应力作用方向与土体沉积面为  $45^\circ$ ,土体受各向异性的影响显著,三者的临界应力比与强度相差幅度较小。

### 2.3 $\delta$ 为 $90^\circ$ 系列

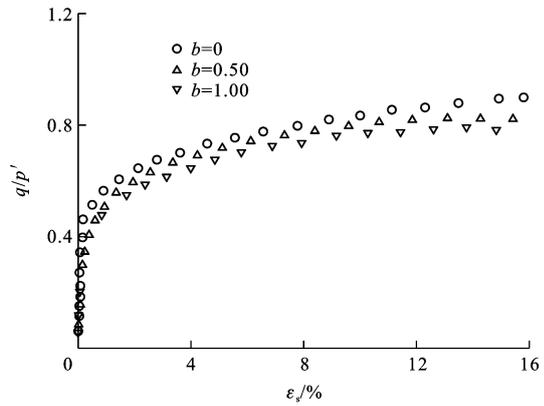
在等压固结模式下,主应力轴旋转角度为  $90^\circ$  时,空心圆柱不排水剪切试验结果见图 7。由图 7 可以看出:随着中主应力系数  $b$  的增加,临界应力比逐渐降低,相应的峰值剪切强度减小;随着应变的发展,应力比逐渐增大,且应力比随着中主应力系数的增大而减小。中主应力系数的 3 个取值所对应的状态均为拉伸状态,但是  $b$  为 0.50、0.75 的试样所对应的状态为内外压不等的非轴对称拉伸状态,二者的峰值剪切强度比较接近,而  $b$  为 1.00 所对应的为内外压相等的轴对称拉伸状态,其峰值剪切强度与前二者相比,降低了约 25%。

### 2.4 $b=\sin^2(\delta)$ 系列

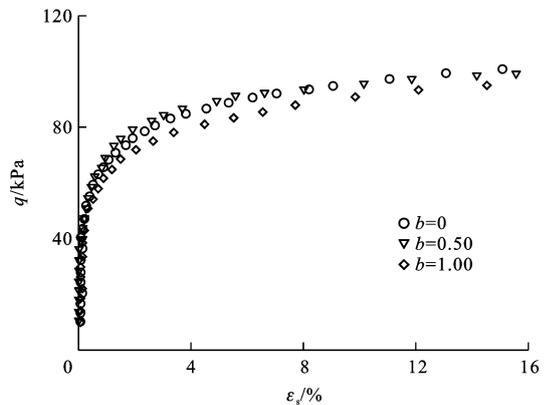
在空心圆柱试验的加载过程中,很多早期研制的空心圆柱仪并不能实现对内外压的单独调控,试验中必须维持内外压恒等,在此种加载条件下,恒有  $b=\sin^2(\delta)$ ,试验不能实现对中主应力系数与主应力轴旋转角度的独立控制。与研究软黏土各向异性有关的几种常见试验加载条件所对应的应力状态如下:TC(Triaxial Compression)为三轴压缩( $\delta=0^\circ$ ,  $b=0$ );TE(Triaxial Extension)为三轴拉伸( $\delta=90^\circ$ ,  $b=1$ );TTC(True Triaxial Compression)为真三轴压缩( $0 \leq b \leq 1$ ,  $\delta=0^\circ$ );TTE(True Triaxial Extension)为真三轴拉伸( $0 \leq b \leq 1$ ,  $\delta=90^\circ$ );PSC(Plane Strain Compression)为平面应变压缩( $\epsilon_2 =$



(a) 偏应力与有效平均应力关系曲线



(b) 应力比与广义剪应变关系曲线

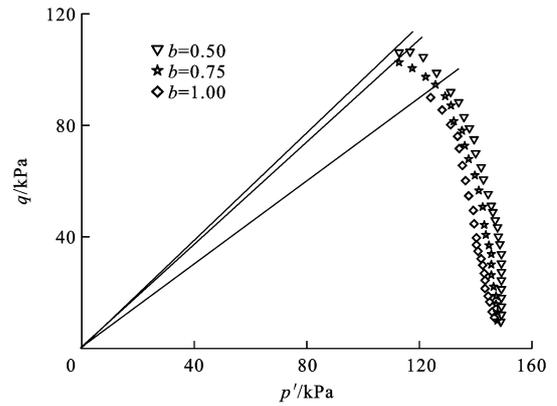


(c) 偏应力与广义剪应变关系曲线

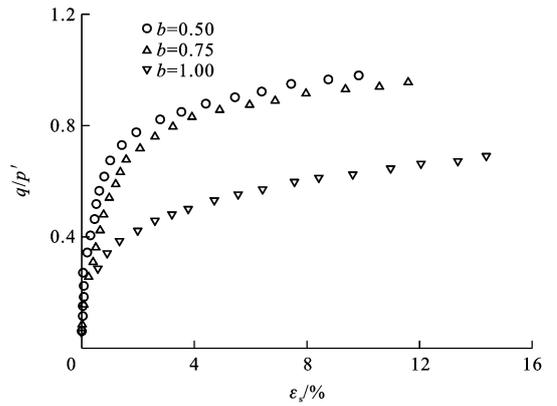
图6  $\delta$  为  $45^\circ$  的试验结果  
Fig. 6 Test results when  $\delta$  is  $45^\circ$

$0, \delta=0^\circ$ ); PSE(Plane Strain Extension)为平面应变拉伸( $\epsilon_2=0, \delta=90^\circ$ ); DSC(Direction Shear Cell)为方向剪切盒( $0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ, \epsilon_2=0$ ); HCA为空心圆柱试验可覆盖所有区域。不同试验加载条件所对应的应力状态范围不同,对试验结果的影响也不同,到目前为止,研究范围最为广泛的为可独立控制内外压的空心圆柱仪(HCA)。

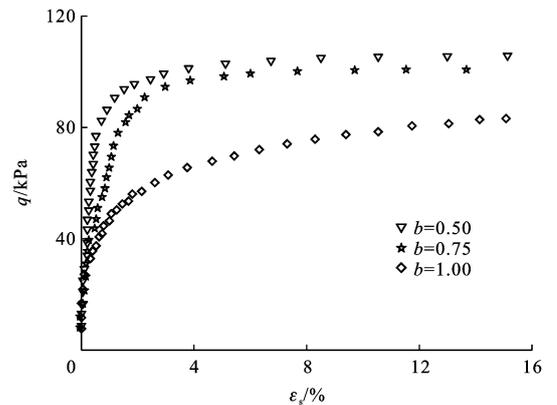
图8为在  $b = \sin^2(\delta)$  条件下空心圆柱不排水剪切试验结果,可以看出:在主应力轴旋转角度由  $0^\circ$  增加为  $90^\circ$  的同时,中主应力系数  $b$  由 0 增加为



(a) 偏应力与有效平均应力关系曲线



(b) 应力比与广义剪应变关系曲线



(c) 偏应力与广义剪应变关系曲线

图7  $\delta$  为  $90^\circ$  的试验结果  
Fig. 7 Test results when  $\delta$  is  $90^\circ$

1.00, 试样的状态由轴对称压缩过渡为轴对称拉伸,试样破坏时对应的应力比逐渐减小,不排水剪切强度逐渐降低。试验结果并不能单独反映中主应力系数  $b$  或主应力轴旋转角度  $\delta$  的影响,而是二者综合的结果。

### 3 结 语

(1) 随中主应力系数的变化,天然软黏土应力应变关系曲线与峰值剪切强度呈现显著差异。

(2) 在主应力轴旋转角度为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  情况下,

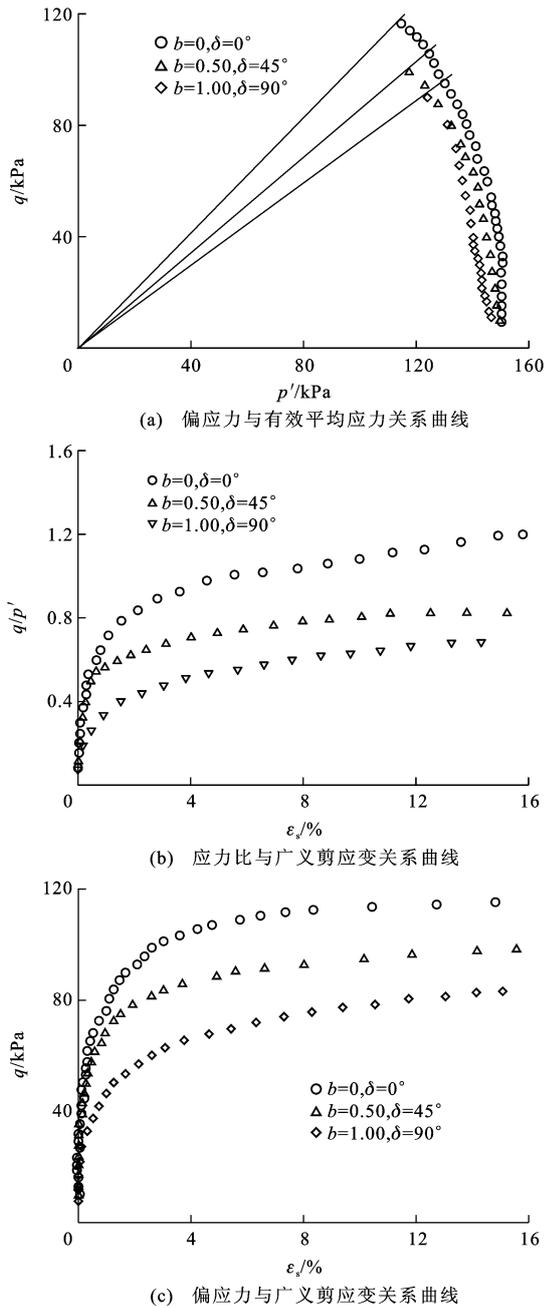


图 8  $b = \sin^2(\delta)$  的试验结果

Fig. 8 Test results when  $b = \sin^2(\delta)$

随着中主应力系数的增加,临界应力比均呈现降低趋势,相应的峰值剪切强度减小。

(3)在主应力轴旋转角度为  $0^\circ$  时,在中主应力系数分别为 0.25、0.50 时试样出现了轻微的应变局部化现象,致使剪应力在达到峰值后呈逐渐降低的趋势。

(4)在  $\delta$  为  $90^\circ$  时, $b$  为 0.50、0.75 时试样所对应的状态为内外压不等的非轴对称拉伸状态,二者的峰值剪切强度比较接近,而  $b$  为 1.00 所对应的为内外压相等的轴对称拉伸状态,其峰值剪切强度与

前二者相比,降低了约 25%。

(5)在  $b = \sin^2(\delta)$  时,即在内外压相等的加载条件下,当主应力轴旋转角度由  $0^\circ$  增加为  $90^\circ$  的同时,中主应力系数  $b$  由 0 增加为 1.00,试样破坏时对应的应力比逐渐减小,不排水剪切强度逐渐降低。

(6)后续研究中将开展交通荷载下主应力轴按特定应力路径旋转时,对天然沉积软黏土变形与强度特性的影响。

参考文献:

References:

[1] ZDRAVKOVIĆ L, POTTS D M, HIGHT D W. The effect of strength anisotropy on the behaviour of embankments on soft ground[J]. Géotechnique, 2002, 52(6): 447-457.

[2] 沈扬,周建,张金良,等.主应力轴循环旋转下原状软黏土临界性状研究[J].浙江大学学报:工学版,2008,42(1):77-82. SHEN Yang, ZHOU Jian, ZHANG Jin-liang, et al. Critical properties of intact soft clay under cyclic principal stress rotation[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2008, 42(1): 77-82. (in Chinese)

[3] 孙红,袁聚云,赵锡宏.软土的真三轴试验研究[J].水利学报,2002(12):74-78. SUN Hong, YUAN Ju-yun, ZHAO Xi-hong. Study on soft soil by the true triaxial tests [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(12): 74-78. (in Chinese)

[4] HIGHT D W, GENS A, SYMES M J. The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils[J]. Géotechnique, 1983, 33(4): 355-383.

[5] 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)

[6] HONG W P, LADE P V. Strain increment and stress directions in torsion shear tests[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 115(10): 1388-1401.

[7] LIN H, PENUMADU D. Experimental investigation on principal stress rotation in Kaolin clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 633-642.

[8] KANDASAMI R K, MURTHY T G. Experimental studies on the influence of intermediate principal stress and inclination on the mechanical behaviour of angular sands[J]. Granular Matter, 2015, 17(2): 217-230.

[9] ZDRAVKOVIĆ L, JARDINE R J. The effect on anisotropy of rotating the principal stress axes during consolidation[J].

(下转第 61 页)

- 模拟分析[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2006, 30(3):496-499.
- LIAO Xiao-xiong, HUANG Yan, GUO Ben, et al. Simulation and analysis of construction state of cable-stayed bridge based on ANSYS[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2006, 30(3): 496-499. (in Chinese)
- [21] 高陈燕. 应用 ANSYS 软件分析连续梁桥的动态响应[D]. 西安:长安大学, 2008.
- GAO Chen-yan. Analysis of dynamic response of the continuous girder bridge with ANSYS[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)
- [22] 颜毅, 杜鹏, 高英祚, 等. 桥梁施工过程分析在 ANSYS 中的实现方法[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2007, 26(增): 18-21.
- YAN Yi, DU Peng, GAO Ying-zuo, et al. Method of bridge construction process analysis in ANSYS [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2007, 26(S): 18-21. (in Chinese)
- [23] BROWN JOHN J M W, LEE J, CHEONG B. Dynamic performance of a curved cable-stayed bridge[J]. Engineering Structures, 1999, 21(11): 1015-1027.
- [24] LOZANO-GALANT J A, PAYÁ-ZAFORTEZA I, XU D, et al. Analysis of the construction process of cable-stayed bridges built on temporary supports [J]. Engineering Structures, 2012(40): 95-106.
- [25] 汪冬生, 吴铁君. ANSYS 中的钢筋混凝土单元[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版, 2004, 28(4): 526-529.
- WANG Dong-sheng, WU Tie-jun. Reinforced concrete units in ANSYS software [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2004, 28(4): 526-529. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 33 页)
- Géotechnique, 2001, 51(1): 69-83.
- [10] ZDRAVKOVIĆ L, JARDINE R J. Undrained anisotropy of  $K_0$ -consolidated silt [J]. Canadian Geotechnique, 2000, 37(1): 178-200.
- [11] ZDRAVKOVIĆ L, JARDINE R J. Some anisotropic stiffness characteristics of a silt under general stress conditions[J]. Géotechnique, 1997, 47(3): 407-437.
- [12] MINH N A. An investigation of the anisotropic stress-strain-strength characteristics of Eocene clay[D]. London: Imperial College London, 2006.
- [13] NISHIMURA S, MINH N A, JARDINE R J. Shear strength anisotropy of natural London clay[J]. Géotechnique, 2007, 57(1): 49-62.
- [14] 聂影, 栾茂田, 王猛, 等. 主应力轴旋转下饱和黏土动力特性的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2009, 28(4): 562-565.
- NIE Ying, LUAN Mao-tian, WANG Meng, et al. Experimental study on dynamic characteristics of saturated clay under cyclic rotation of principal stress directions[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2009, 28(4): 562-565. (in Chinese)
- [15] 沈扬, 周建, 张金良, 等. 考虑主应力方向变化的原状黏土强度及超静孔压特性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(6): 843-847.
- SHEN Yang, ZHOU Jian, ZHANG Jin-liang, et al. Research on strength and pore pressure of intact clay considering variation of principal stress direction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 843-847. (in Chinese)
- [16] 沈扬, 周建, 龚晓南, 等. 考虑主应力方向变化的原状软黏土应力应变性状试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3720-3726.
- SHEN Yang, ZHOU Jian, GONG Xiao-nan, et al. Experimental study of stress-strain properties of intact soft clay considering the change of principal stress direction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3720-3726. (in Chinese)
- [17] 管林波, 周建, 张勋, 等. 中主应力系数和主应力方向对原状黏土各向异性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3871-3877.
- GUAN Lin-bo, ZHOU Jian, ZHANG Xun, et al. Study of influence of parameters of intermediate principal stress and principal stress direction on anisotropy of intact clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3871-3877. (in Chinese)
- [18] 严佳佳, 周建, 刘正义, 等. 主应力轴纯旋转条件下黏土弹塑性变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增2): 4350-4358.
- YAN Jia-jia, ZHOU Jian, LIU Zheng-yi, et al. Elasto-plastic deformation behavior of intact clay subjected to principal stress rotation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4350-4358. (in Chinese)
- [19] 周建, 郑鸿宾, 温晓贵, 等. 考虑中主应力系数影响的主应力轴旋转下原状软黏土变形研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2011, 45(12): 2134-2141.
- ZHOU Jian, ZHENG Hong-bin, WEN Xiao-gui, et al. Deformation of intact soft clay under principal stress rotation with effect of intermediate principal stress [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(12): 2134-2141. (in Chinese)
- [20] SYMES M J, GENS A, HIGHT D W. Drained principal stress rotation in saturated sand[J]. Géotechnique, 1988, 38(1): 59-81.