

主应力轴旋转下原状软黏土的变形及强度特性

柳艳华, 谢永利

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为研究主应力轴旋转情况下饱和软黏土的变形及强度特征,采用先进的空心圆柱扭剪仪(HCA)对软黏土进行了一系列不排水剪切试验。试验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 种不同中主应力系数情况下,对试样进行不同主应力轴旋转角度下的不排水剪切试验;剪切过程中保持平均应力、中主应力系数及主应力轴旋转角度不变,只增加偏应力,研究不同中主应力系数情况下主应力轴旋转角度对软黏土应力应变特征以及强度特性的影响。研究结果表明:不同主应力轴旋转角度下天然软黏土的变形及强度特征存在明显的差异,在中主应力系数 $b=0.5$ 的非轴对称加载情况下,不排水剪切强度随着主应力轴旋转角度的增大呈勺形变化;在 $b=0$ 的轴对称压缩条件及 $b=1$ 的轴对称拉伸条件下,随主应力轴旋转角度的增加,不排水剪切强度均呈递减趋势。

关键词:道路工程;软黏土;主应力轴旋转;试验研究;空心圆柱扭剪切

中图分类号:U416;TU44

文献标志码:A

Behaviors of deformation and strength of intact 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: The hollow cylinder apparatus (HCA) was used to study the deformation behavior and strength characteristics of soft clay under rotation of principal stress axes. A series of undrained shear tests were carried out on saturated soft clay under isotropic consolidation mode. The focus was on the effect of rotational angle of principal stress axes on stress-strain behavior and strength characteristics of soft clay under different coefficients of intermediate principal stress. During the shear tests, the average stress value remained unchanged along with the rotational angle of principal stress axes and the coefficient of intermediate principal stress, while the deviator stress was increased. The results show that the stress-strain behavior and undrained strength characteristics of natural soft clay are different obviously with different rotational angles of principal stress axes. The curve of undrained shear strength appears scoop style with the increase of rotational angle of principal stress axes under isotropic consolidation mode with $b=0.5$. The undrained shear strength decreases with the increase of rotational angle of principal stress axes with $b=0$ and $b=1$. 2 tabs, 5 figs, 17 refs.

Key words: road engineering; soft clay; rotation of principal stress axe; experimental study; hollow cylinder apparatus (HCA)

0 引言

主应力轴旋转是主应力的方向相对于某固定方向发生变化,很多土木工程在其建造以及运行过程中均会发生主应力轴旋转现象,尤其在边坡、土方开挖及堤坝等工程问题中^[1]。此外,在波浪、交通及地震等复杂循环荷载作用下,地基土中的主应力幅值和主应力轴方向均会按一定路径发生变化,甚至在某些特殊条件下地基土中可能主要发生的是主应力轴的循环旋转^[2-4]。自 20 世纪 80 年代以来,由于空心圆柱扭剪仪可以实现主应力幅值和方向的任意变化,故成为目前研究应力主轴旋转问题的主要手段^[5]。许多学者利用空心圆柱扭剪仪对复杂静力、动力荷载引起的主应力方向变化时各种性质土的变形以及强度特性进行了试验研究^[6-16]。

目前,关于主应力轴旋转试验研究的对象多为重塑砂土及粉土,而以黏性土(特别是原状黏土)为研究对象的则相对较少。其原因一方面是黏土本身性状的复杂性及制样时的难度较大,另一方面是试验中耗时较长。中国沿海地区广泛分布着深厚的软弱黏土层,在其上建造建筑物容易发生或大或小的工程事故,而作为公路或者铁路等路基承受交通荷载时易产生过量的变形,甚至开裂。因此,如何合理评价主应力轴旋转对软黏土变形及强度的影响就显得尤为关键。为此,本文以上海典型原状软黏土为研究对象,进行等压固结情况下的不排水剪切试验研究,探讨主应力轴旋转角度对两相饱和和软黏土应力应变关系及强度特征的影响。

1 试验条件

1.1 试验仪器

本次试验采用 GDS 公司的动态空心圆柱扭剪仪(HCA)进行主应力轴旋转研究。图 1 给出了空心圆柱试验中空心试样整体以及薄壁单元体上的受力简图。

在空心圆柱扭剪仪中,能够对薄壁试样上的轴力 W 、扭矩 M_T 、内压 p_i 及外压 p_o 进行独立控制,从而使得试样中应力主轴的旋转变现实。这 4 个加载参数在试样薄壁单元体上产生一组应力参数;轴向正应力 σ_z 、径向正应力 σ_r 、环向正应力 σ_θ 以及扭

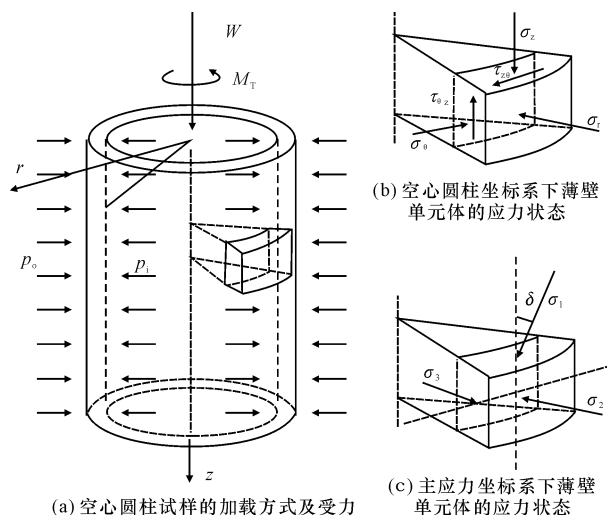


图 1 空心圆柱试样加载方式及受力示意

Fig. 1 Applied loads mode and stress components in hollow cylinder specimen

剪应力 $\tau_{z\theta}$,如图 1(b)所示。而在研究主应力轴旋转的土木工程问题中,应力坐标系应用更为广泛,即大、中、小主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 以及大(小)主应力的旋转角度 δ (图 1(c)),二者恰好形成映射关系。式(1)给出了主应力坐标系 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 δ 与空心圆柱坐标系 σ_z 、 σ_r 、 σ_θ 、 $\tau_{z\theta}$ 的对应关系。式(2)给出了 3 个主应力与 p 、 q 、 b 的对应关系,其中 p 为总平均应力, q 为偏应力,即 $q = \sigma_1 - \sigma_3$,而 b 为中主应力系数,即 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 。因而空心圆柱中土单元体的应力状态也可表示为 p 、 q 、 b 、 δ 。

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\delta) \\ \sigma_r = \sigma_2 \\ \sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\delta) \\ \tau_{z\theta} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\delta) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \\ q = \sigma_1 - \sigma_3 \\ b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \end{cases} \quad (2)$$

在试验过程中,可通过空心圆柱扭剪仪软件中的专用加载模块,直接控制应力坐标系下的应力参数 p 、 q 、 b 、 δ ,进而从应力要素的角度来实现主应力轴旋转的试验。

1.2 试样情况

本试验所用土样为上海第④层灰色淤泥质黏土原状样,土样取自上海某基坑工程,埋深为 14 m,取土方法采用 PVC 管切土法^[17]。根据 14 m 以上各土层的有效重度及其厚度,计算得原位竖向应力 σ'_{vc} 为 140 kPa,所取原状软黏土基本物理性质如表 1 所示。由表 1 可知,所研究的原状软黏土含水率高于液限,孔隙比大于 1.0。经测试,试样的饱和度达到 98% 以上,超固结比为 1.0。属于正常固

结饱和和软黏土。此外,对试样进行了不同围压下的三轴不排水剪切试验,得到三轴压缩状态下软黏土临界状态线的斜率 $M_c=1.277$ 。本试验进行的所有空心圆柱试验的试样尺寸均为高 200 mm、外径 100 mm、内径 60 mm。试样外壁的切取与三轴试验样品的制备方法类似,对样品内壁的切取采用特制内心切割器。对于空心圆柱试样的饱和均采用反压饱和法,与三轴试验类似,在此不再赘述。

表 1 原状软黏土基本物理性质
Tab.1 Physical indices of undisturbed soft clay

天然含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	比重 G_S	孔隙比 e_0	超固结比	静止侧压力系数 K_0
52.7	45.5	23.6	21.9	1.33	2.75	1.413	1.0	0.6

2 试验方案

对上海软黏土进行的主应力轴旋转试验,研究重点为主应力轴旋转角度 δ 对软黏土应力应变及强度特征的影响。利用空心圆柱系统中的专用加载模块,对等压固结软黏土的空心薄壁试样进行了一系列不同 b 值和 δ 值下的不排水剪切试验,剪切过程中保持平均应力 p 、中主应力系数 b 、主应力轴旋转角度 δ 不变,只增加偏应力 q 。所有试验采用的平均有效固结应力 p'_0 均为 150 kPa,具体

试验方案见表 2。根据 Symes 等学者的研究,在空心圆柱测试中,要尽可能保证样品的应力应变均匀分布^[18]。然而,为模拟某些特定应力路径,需要对样品施加不相等的内外压而达到预定的应力状态,但样品上施加的内外压 p_i 与 p_o 之间的差异将导致样品应力应变的不均匀分布。为保证测试的准确性,建议在空心圆柱测试中预设路径的外压与内压的比值 p_o/p_i 介于 0.9~1.2 之间。因此本研究在确定加载应力路径的过程中,避开了内外压相差较大的限制区域。

表 2 空心圆柱不排水剪切试验方案
Tab.2 Test program for undrained shear of HCA

固结模式	等压固结								
b	0			0.5					1.0
$\delta/(^\circ)$	0	30	45	0	30	45	60	90	45 60 90

3 试验成果及分析

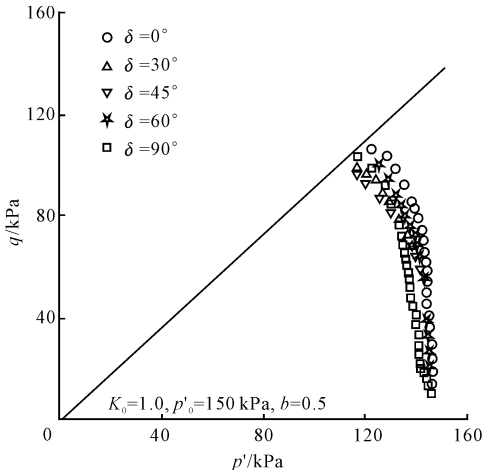
本文利用空心圆柱扭剪仪,对饱和和软黏土进行不同中主应力系数 b 及主应力轴旋转角度 δ 下的不排水剪切试验。按中主应力系数 b 、主应力轴旋转角度 δ 可将其分为 3 个部分,即 $b=0.5$ 系列、 $b=0$ 系列和 $b=1$ 系列。

由于在主应力轴发生旋转的扭剪试验中,应考虑扭剪各应变的组合影响,因而在试验结果整理时采用广义剪应变 ϵ_s 。另一方面,由于中主应力系数的定义为 $b=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$,在试验控制过程中要求分母 $\sigma_1-\sigma_3\neq 0$,即初始偏应力 $q\neq 0$,因此所有等压固结模式下的剪切试验,初始偏应力 q 均设置为 10 kPa。对 3 个系列的试验结果分述如下。

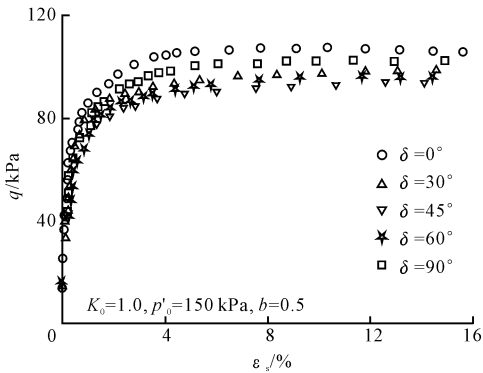
3.1 $b=0.5$ 系列

下页图 2 给出了上海软黏土在等压固结模式下 $b=0.5$,不同主应力轴旋转角度时空心圆柱不排水剪切试验结果,其中 k_0 为静止侧压力系数, p'_0 为平均有效固结应力。图 2(a)为不排水应力路径曲线,图 2(b)为不排水应力应变关系曲线。由图 2 可见,在中主应力系数为定值的前提下,随着主应力轴旋转角度的不同,应力路径曲线以及应力应变关系曲线均呈现明显差异。由应力路径曲线可以看出,不同主应力轴旋转角度所对应的试样在破坏时的应力比并不相同,尤其是 δ 为 0° 、 90° 与 δ 为 30° 、 45° 、 60° 存在明显的差别,这是由于空心圆柱试验本身旋转位移量程限制所致;另一方面,在 $b=0.5$ 时试样出现了轻微的应变局部化现象,使得试验中各主应力轴旋转角度下的峰值应力比均很难达到三轴试验中

的最终临界状态。因此,应力路径曲线图只给出了几组旋转角度中峰值应力比最高的曲线所对应的临界线,由于上述两方面问题的存在,使得其与理论上的临界状态线存在一定的偏差。



(a) 不排水应力路径试验曲线



(b) 不排水应力应变试验曲线

图 2 $b=0.5$ 系列空心圆柱不排水剪切试验

Fig. 2 Hollow cylinder undrained shear test with $b=0.5$

图 3 给出了不排水条件下 $b=0.5$ 时空心圆柱剪切试验的峰值强度随主应力轴旋转角度的变化规律,图中实心点为试验强度值。可见,随着主应力轴旋转角度的增加($0^\circ \rightarrow 90^\circ$),强度曲线呈勺形变化,在 $\delta=45^\circ$ 下所对应的峰值强度介于 $\delta=0^\circ$ 和 $\delta=90^\circ$ 之间,这种强度变化趋势与沈扬对杭州软黏土的研究类似^[9]。一方面与饱和软黏土内部自身的排列结构有关,另一方面则与非轴对称($b=0.5$)的加载方式有着密不可分的关系。同时,不排水剪切强度值从 $\delta=0^\circ$ 到 $\delta=30^\circ$ 下降明显,说明试样在 δ 为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内呈现出较强的各向异性。

3.2 $b=0$ 系列

图 4 给出了软黏土在等压固结模式下, b 值取 0,主应力轴旋转角度 δ 分别为 0° 、 30° 、 45° 时空心圆

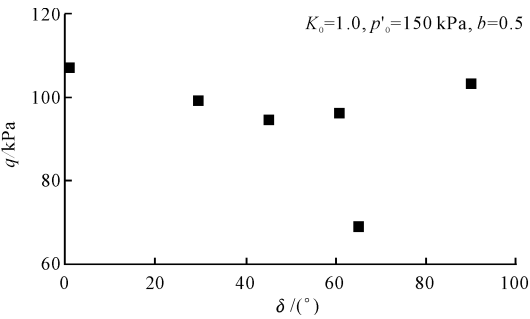
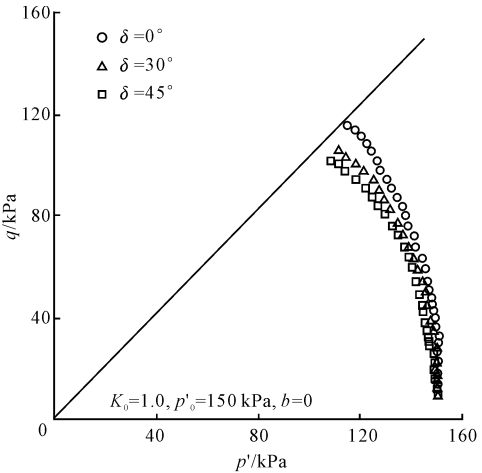


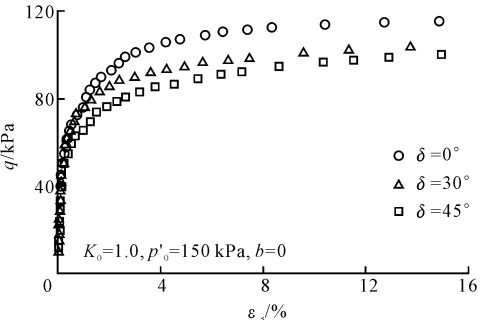
图 3 $b=0.5$ 系列软黏土剪切强度变化曲线

Fig. 3 Curve of shear strength for soft clay with $b=0.5$

柱不排水剪切的试验结果。同样,图 4(a)为不排水应力路径曲线,图 4(b)为不排水应力应变关系曲线。由图 4 可见,随着主应力轴旋转角度从 0° 增大到 45° ,不排水剪切强度逐渐降低,且从 0° 到 30° 时的变化幅度相对较大; δ 为 30° 、 45° 的试验结果同样受旋转位移量程限制,破坏时的应力比较 $\delta=0^\circ$ 时要低。



(a) 不排水应力路径试验曲线



(b) 不排水应力应变试验曲线

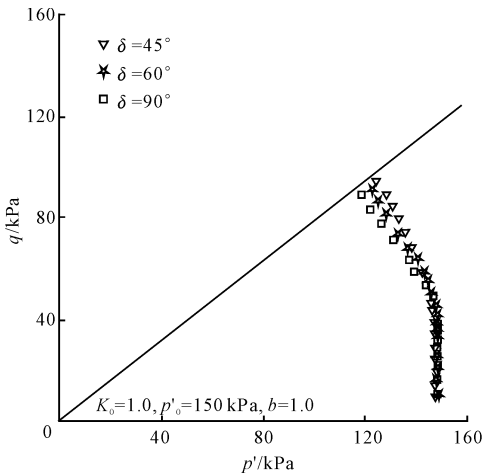
图 4 $b=0$ 系列空心圆柱不排水剪切试验

Fig. 4 Hollow cylinder undrained shear test with $b=0$

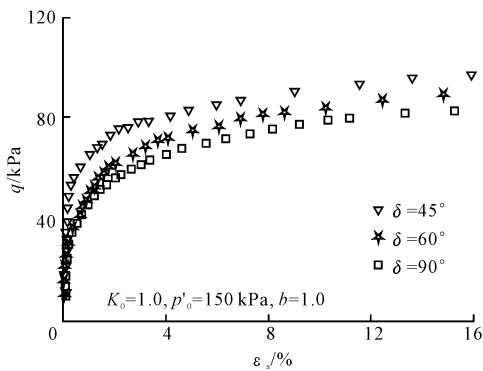
3.3 $b=1$ 系列

下页图 5 给出了上海软黏土等压固结模式下 b

值取为 1、应力轴旋转角度 δ 分别为 45° 、 60° 、 90° 时空心圆柱不排水剪切的试验结果。同样图 5(a) 为不排水应力路径曲线,图 5(b) 为不排水应力应变关系曲线。由图 5 可见,随着主应力轴旋转角度从 45° 增大到 90° ,峰值剪切强度逐渐降低;与 $b=0$ 及 $b=0.5$ 系列相比,3 组旋转角度下试样破坏时的应力比相对比较接近。



(a) 不排水应力路径试验曲线



(b) 不排水应力应变试验曲线

图 5 $b=1$ 系列空心圆柱不排水剪切试验

Fig. 5 Hollow cylinder undrained shear test with $b=1$

4 结 语

(1) 随主应力轴旋转角度的不同,天然软黏土应力应变关系曲线以及峰值强度呈现显著差异。

(2) 在 $b=0.5$ 的非轴对称加载情况下,随着主应力轴旋转角度的增加($0^\circ \rightarrow 90^\circ$),不排水剪切强度曲线均呈匀形变化, $\delta=45^\circ$ 所对应的峰值强度介于 δ 为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间;且不排水剪切强度值在 δ 为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时下降明显。

(3) 在 $b=0$ 的轴对称压缩条件下,随着主应力轴旋转角度从 0° 增加到 45° ,不排水剪切强度逐渐

降低。

(4) 在 $b=1$ 的轴对称拉伸条件下,随着主应力轴旋转角度从 45° 增至 90° ,不排水剪切强度也呈减小趋势。

(5) 后续的研究将开展软黏土在实际交通荷载及波浪荷载等复杂加载应力路径下,主应力轴循环旋转的试验模拟工作,并在此基础上建立更合理的主应力轴旋转本构模型。

参考文献:

References:

[1] Zdravkovic L, Potts D M, Hight D W. The effect of strength anisotropy on the behavior of embankments on soft ground[J]. Geotechnique, 2002, 52(6): 447-457.

[2] Ishihara K, Towhata K. Sand response to cyclic rotation of principal stress directions as induced by wave loads[J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 11-26.

[3] Ishihara K. Soil behavior in earthquake geotechnics [M]. New York: Oxford University Press, 1996.

[4] 王常晶, 陈云敏. 移动荷载引起的地基应力状态变化及主应力轴旋转[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1698-1704.

WANG Chang-jing, CHEN Yun-min. Stress state variation and principal stress axes rotation of ground induced by moving loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1698-1704. (in Chinese)

[5] 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]. Geotechnique, 1983, 33(4): 355-383.

[6] Sivathayalan S, Vaid Y P. Influence of generalized initial state and principal stress rotation on the undrained response of sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(1): 63-76.

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

[8] Nishimura S, Minh N A, Jardine R J. Shear strength anisotropy of natural London clay[J]. Geotechnique, 2007, 57(1): 49-62.

[9] 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)
- [10] Rolo R. The anisotropic stress-strain-strength behaviour of brittle sediments[D]. London: Imperial College London, 2003.
- [11] Shahnazari H, Towhata I. Torsion shear tests on cyclic stress-dilatancy relationship of sand[J]. Soils and Foundations, 2002, 42(1):105-119.
- [12] 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):666-670. (in Chinese)
- [13] Nguyen A M. An investigation of the anisotropic stress-strain-strength characteristics of Eocene clay [D]. London: Imperial College, 2006.
- [14] 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)
- [15] 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 Edition, 2009, 28(4):562-565. (in Chinese)
- [16] 蔡燕燕, 俞缙, 余海岁, 等. 考虑主应力轴旋转的砂土变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(2):417-424.
- CAI Yan-yan, YU Jin, YU Hai-sui, et al. Experimental study of deformation behavior of sand under rotation of principal stress axes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2):417-424. (in Chinese)
- [17] 柳艳华, 谢永利. 基于结构性及各向异性的软黏土变形性状试验[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(2):135-142.
- LIU Yan-hua, XIE Yong-li. Test on Deformation character of soft clay based on structure and anisotropy[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(2):135-142. (in Chinese)
- [18] Symes M J. Rotation of principal stresses in sand [D]. London: Imperial College, 1983.