

文章编号: 1000-7598 (2013) 01-0047-06

上海黏土强度特性真三轴试验研究

盛佳韧, 武朝军, 叶冠林, 王建华

(上海交通大学 土木工程系, 上海 200240)

摘 要: 利用自主改造的、大主应力与小主应力方向由刚性加压板加载、中主应力方向由围压室液压加载的自动控制刚柔复合真三轴仪, 对上海原状软土进行同一 π 面上不同洛德角真三轴固结排水剪切试验。原状土样通过分块抽样法获取, 共进行了 5 组不同洛德角 (0° 、 15° 、 30° 、 45° 和 60°) 排水剪切试验。试验结果显示, 上海原状软土抗剪强度、屈服和破坏点位置随洛德角的增大而减小, 体积变化量先增大后减小。三向应力状态下上海软土的破坏强度接近空间滑移面 (SMP) 破坏准则。

关 键 词: 真三轴试验; 上海黏土; 排水剪切试验; 洛德角

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Strength property of Shanghai clay in true triaxial tests

SHENG Jia-ren, WU Chao-jun, YE Guan-lin, WANG Jian-hua

(Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A series of isotropic consolidated drained true triaxial tests with different Lode angles in the same π plane are carried out with an automatic controlled mixed boundary true triaxial apparatus. The maximum and minor principal stresses are applied by two pairs of rigid platens; and the intermediate principal stress is applied by water pressure in triaxial cell. Undisturbed soil sample is prepared by block sampling method; and totally 5 drained tests with different Lode angles (0° , 15° , 30° , 45° , 60°) are presented. Test results show that the shear strength, the yielding & failure points of Shanghai soft clay decrease while Lode angles increase. The volume change increases first and turns to decrease when Lode angle is larger than 30° . In general, three-dimensional strength of the Shanghai soft clay obeys the SMP (spatial mobilized plane) failure criterion.

Key words: true triaxial test; Shanghai clay; drained shear test; Lode angle

1 引 言

上海④层软黏土埋深较浅, 其天然含水率较高、强度较低, 颗粒中以粉粒为主, 为典型的粉质黏土。其工程性质不同于一般黏土, 对其在三向应力状态下的强度特性进行真三轴试验研究是必要的。

国内外许多学者的真三轴试验结果表明, 土体强度受到中主应力的影响。常用的试验方法有 2 种: 同一 π 面上不同洛德角试验和 b 值试验, 其中 $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$, σ_1 为大主应力、 σ_2 为中主应力、 σ_3 为小主应力, b 值与 π 面上洛德角相互对应。Yong 等^[1]、Lade 等^[2]分别对重塑高岭土、Santa Monica Beach 砂进行真三轴试验, 均发现中主应力

对土体的强度和变形有较大影响; Kirkgard 等^[3]对 San Francisco Bay 淤泥进行各种 b 值非排水剪切试验, 结果显示, 该种 π 面上破坏面接近 Lade-Duncan 破坏面; Nakai 等^[4]对重塑 Fujinomori 黏土进行不同洛德角排水剪切试验, 得到的试验结果符合空间滑移面 (spatial mobilized plane) 破坏准则; Callisto 等^[5]对原状 Pisa 黏土进行变 b 值试验, 发现该黏土 π 面上破坏面介于 Mohr-Coulomb 与 Lade-Duncan 破坏面之间; Pranshant 等^[6]对高岭土进行了非排水剪切试验, 结果表明, 高岭土破坏面符合 Lade-Duncan 破坏准则。

从 20 世纪 80 年代开始, 国内许多学者对土体三向受力特性进行真三轴试验研究。李广信^[7]对承

收稿日期: 2011-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 41002097); 上海市重点学科建设项目 (No. B208)。

第一作者简介: 盛佳韧, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要从事黏土与软岩室内试验与本构模型方面的研究工作。E-mail: shengjiaren@sjtu.edu.cn

通讯作者: 叶冠林, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事土力学及岩土工程数值计算方面的研究工作。E-mail: ygl@sjtu.edu.cn

德中密砂, 朱俊高等^[8]对福建平潭标准砂和上海夹粉砂黏土, 邵生俊^[9]对黄土, Yin 等^[10]对 CDG (全风化花岗岩) 进行真三轴试验, 也得到了中主应力对土体强度有一定影响的结论; 袁聚云^[11]、赵锡宏^[12]等对上海软土进行了小主应力不变, 轴向恒定应变速率加载, 改变中主应力来恒定 b 值的不排水剪切试验, 并提出了新的本构模型。但国内外学者对天然软土的试验研究较少。

本文将介绍本次试验所用的自动控制真三轴仪, 以及上海原状软土进行等平均主应力 p 的各个洛德角排水剪切试验的过程, 并从试验结果中探讨上海原状软土在三向应力条件下的强度特性。

2 自动控制刚柔复合真三轴仪

2.1 三轴室构造特点

真三轴仪根据 3 向应力边界条件可分为刚性、柔性和刚柔复合 3 种形式。刚性真三轴仪以 Airey 等^[13]设计的采用 6 块滑动加压板的剑桥真三轴仪为代表, 优点是土样在 3 个方向均能发生较大变形, 但存在刚性板与土体摩擦、刚性板之间摩擦影响土样受力的缺点, 试样安装过程也较为繁琐^[14]; 柔性真三轴仪以 Ko 等^[15]发明的刚性框架加 6 个加压囊的模式为代表, 仪器组装相对简便, 6 个柔性加压面能保证试样表面受力均匀, 但相邻柔性加压囊容易产生相互干扰。

复合型真三轴仪可分为 1 个方向刚性加荷和 2 个方向刚性加荷 2 种。赵锡宏、邵生俊开发的复合真三轴仪属于一个方向刚性加荷^[9, 11], 另 2 个方向采用柔性囊或压力室内液压加载。Green 于 1969 年发明的复合真三轴仪属于 2 个方向刚性加荷, σ_1 、 σ_2 由刚性加压板提供, σ_3 由压力室内水压直接作用在试样外橡皮膜上^[11]。但此类复合真三轴仪存在 2 个问题:

(1) 因构造原因无法实现 π 面上 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的任意洛德角应力路径试验, 即小主应力 σ_3 由围压室内水压施加, 导致其大小不能超过竖直方向和水平刚性板方向的应力。

(2) 轴向刚性板容易与中主应力方向刚性板相互顶托 (见图 1), 影响试样的受力与变形。

本次研究所用的自动控制复合真三轴仪^[16]与 1983 年 Nakai^[4]开发的压力室结构相似 (见图 2), 两对刚性加压板分别施加竖直与水平向压力, 另 2 个面由压力室内水压加压。该种类型压力室较为巧妙地设计解决了上述 2 个问题, 具体解决方法如下:

(1) 通过改变橡皮膜位置实现 π 面上 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的任意洛德角应力路径试验。一般复合真三轴仪的橡皮膜只包裹住土样, 刚性板在橡皮膜外 (见图 3(a)), 水平方向刚性板施加在土样上的应力等于压力室内水压与刚性板压力之和, 无法小于围压室的水压; 而 Nakai 将橡皮膜设计于刚性板之外 (见图 3(b)), 通过与刚性板相连的水平向气缸施加压力或拉力, 可实现剪切时土样在该方向上所受压力小于围压室内水压, 以此达到进行 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的任意洛德角试验的目的。

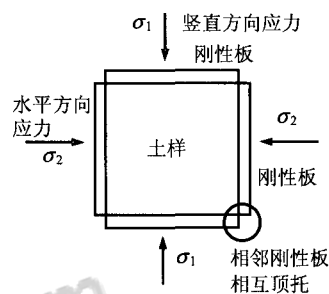


图1 刚性板相互顶托问题
Fig.1 Interference of rigid plates

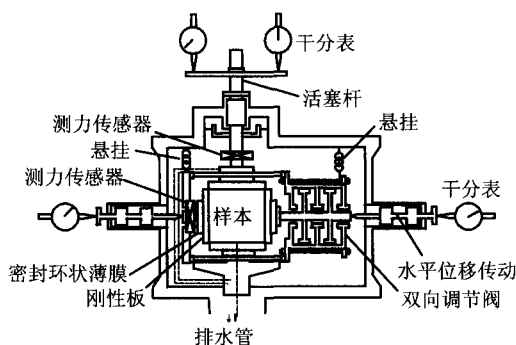


图2 试验用复合真三轴仪压力室结构图
Fig.2 Triaxial chamber of mixed boundary true triaxial apparatuses

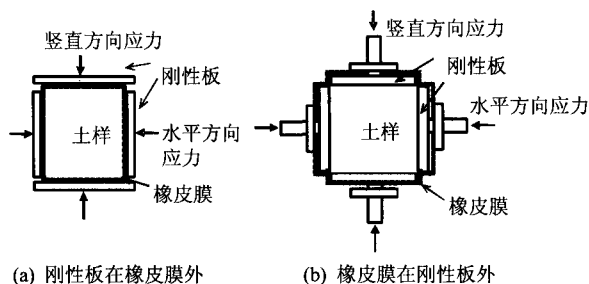


图3 两种复合真三轴仪不同橡皮膜位置
Fig.3 Different rubber membrane positions of two rigid & flexible boundary mixed true triaxial apparatuses

(2) 通过用竖向刚性板 σ_1 、围压室水压施加 σ_2 、水平方向刚性板施加 σ_3 的加载方法, 保证在

剪切时两对刚性板朝相反方向运动, 不相互顶托。一些学者为解决这一问题提出了不少方案。Lade 等^[17]于 1973 年设计了软木和金属板复合的中主应力方向加压板来解决这个问题(见图 4)。复合中压板的垂直方向刚度十分小, 轴向钢板压在其上时能不受太大抗力自由变形; 而水平方向刚度相当大, 水平向可以等效为刚性板。殷宗泽等^[18]在 1999 年开发了类似设计的 ZSY-1 型复合真三轴仪; 而 Yin 等^[10]在 2010 年采取的方法是将 Hambly 等提出的刚性真三轴仪滑动板设计方法应用于复合真三轴仪两对刚性板上。本试验使用的压力室橡皮膜包于刚性加压板之外, 使得 $0^\circ \sim 60^\circ$ 的洛德角试验中, 轴向刚性板施加的 σ_1 , 水平刚性板施加 σ_3 , 即竖直方向发生压缩变形, 水平刚性板方向发生拉伸变形, 解决了相邻刚性板相互顶托问题。

相对于 Lade^[2]与 Yin^[10]等的解决方法, 这种方法在构造上较为简单, 有利于设备在长时间的固结与排水试验中保持稳定, 同时能避免两对刚性板同时向里压时造成的相互顶托问题。作者的大量试验也证实了其在排水试验中的可靠性。

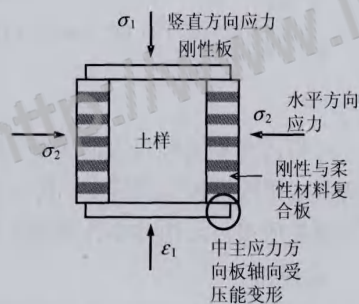


图 4 轴向可压缩中主应力加压板

Fig.4 Vertical compressible lateral rigid plates

2.2 本文所做改进

本试验机在 Nakai 三轴室的基础上做了改进:

(1) 减小了试样尺寸, 现为 $8.0 \text{ cm} \times 8.0 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm}$, 可以减少黏土试样排水时间, 有利于进行排水剪切试验。

(2) 将轴向荷载传感器安装在压力室内(见图 2), 减小了密封衬套摩擦对轴力测定的影响。

自主开发了新的配套自动控制装置, 采用自编控制软件、微机、D-A 转换卡、电-空调压阀(E/P regulator), 对 3 个方向主应力进行实时、无级自动控制; 利用应力、变形、孔压和体变传感器和 TDS300 数据采集仪对土体三向应力、变形、孔压

与体积变化进行自动测量。改造后的真三轴仪能进行精细复杂的应力路径试验, 装置见图 5。系统的详细介绍可参考文献[16]。

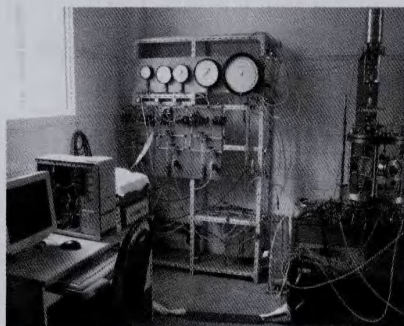


图 5 试验用自动控制刚柔复合真三轴仪

Fig.5 Automatic control mixed rigid and flexible boundary true triaxial apparatus used in tests

上海软土压缩性较大, 固结过程中两对刚性板容易发生相互顶托。为此, 本次试验采用预切较大尺寸试样方法(通过多次尝试可知, 得到 $8.5 \text{ cm} \times 8.5 \text{ cm} \times 5.3 \text{ cm}$ 对于上海④号软土较为合适), 保证土样固结完成后刚性板没有相互接触, 且固结完成后尺寸基本为 $8.0 \text{ cm} \times 8.0 \text{ cm} \times 5.0 \text{ cm}$, 将边角效应降到最低。

3 土样获取与仪器组装

本次研究用上海④号软土从上海龙华地区某地铁车站基坑开挖现场取得, 埋深为 8.0 m , 是灰色饱和粉质黏土。采用分块抽样法取土, 在切成立方体的土样外包裹保鲜膜、铝箔、纱布并蜡封, 能够较大幅度地保存土体在自然条件下的特性。包裹后的土样见图 6。



图 6 分块抽样包裹后的土样

Fig.6 Packed soil sample by block sampling method

试样制备与仪器安装流程如下：

- (1) 采用对土样扰动较小的钢丝锯将土样切成预定大小（8.5 cm×8.5 cm×5.3 cm）（见图 7），在 6 个面上贴上滤纸。
- (2) 在两对加压不锈钢板上涂抹润滑用硅脂，并贴上特氟龙薄膜，以减小不锈钢加压板与土样之间的摩擦。
- (3) 在加压钢板之间拉好乳胶膜，将试样放置在橡皮膜内，向试样与橡皮膜间加水以排出空气。
- (4) 组装压力室，并向内注水，接好仪表和各类管线。
- (5) 在控制软件中设定土样固结压力，剪切应力路径、固结、剪切时间和自动测量时间间隔等参数，开始进行试验。

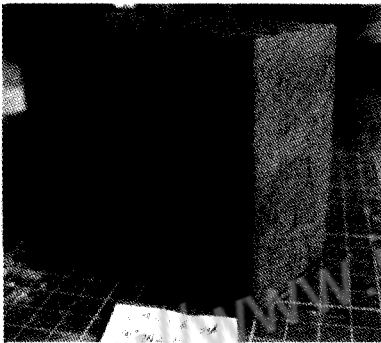


图 7 制备完成后方形试样
Fig.7 Rectangle specimen for testing

4 试验方法与结果分析

4.1 试验方法

先进行等向固结，然后进行不同洛德角排水剪切试验，研究上海软黏土在三向应力状态下的强度特性。土样的基本物理特性见表 1。固结压力都取为 100 kPa（大于 8 m 埋深土体初始固结应力，为正常固结），固结时间为 5 d，用根号 t 法确定固结是否结束；剪切时在如图 8 所示 π 面内 1 区中取 5 个洛德角（0°、15°、30°、45°和 60°）。剪切过程中采用应力控制的方法控制 3 个主应力沿设定的洛德角应力路径变化。为保证排水剪切过程中土样内孔压完全消散，剪应力增加速率控制在 0.33 kPa/h，每个试样剪切时间设置约为 10 d 左右。

表 1 上海软土基本物理参数

Table 1 General parameters of Shanghai soft clay					
液限指数	塑限指数	初始孔隙比	压缩指数	回弹指数	密度
I_L	I_P	e_0	λ	κ	$\rho/(g/cm^3)$
1.41	0.18	1.22	0.133	0.036	1.69

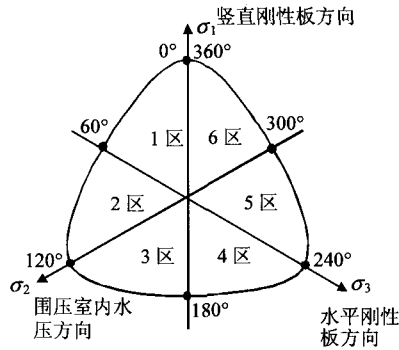


图 8 剪切试验洛德角区域选取
Fig.8 Choice of Lode angle sector for shear tests

4.2 试验结果分析

上海原状软土 0°~60°试验得到应变-剪应力 ($\varepsilon - \sigma_3$) 曲线和偏应变-剪应力-体积应变 ($\varepsilon_d - \sigma_3 - \varepsilon_v$) 曲线见图 9。剪应力 σ_s 的定义为

$$\sigma_s = \sqrt{2J_2} = \sqrt{2 \times \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \tag{1}$$

偏应变 ε_d 的定义为

$$\varepsilon_d = \sqrt{2J_2'} = \sqrt{2 \times \frac{1}{6} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \tag{2}$$

式中： ε_1 、 ε_2 和 ε_3 分别为竖直方向应变、围压室水压方向应变和水平刚性板方向应变，其中 ε_1 和 ε_3 由位移计直接测量所得， ε_2 由体变计得到的体积应变 ε_v 减去 ε_1 、 ε_3 所得。

由图中可以看出，上海原状软土的抗剪强度随着洛德角的增大，有不断降低的趋势，60°拉伸强度比 0°压缩强度低大约 27%左右；土体强度在破坏前随应变一直增加，没有出现结构性较强黏土在较低围压下应变软化现象，这可能与试验采用应力控制加载有关。

各个洛德角试验曲线屈服点与破坏点位置见图 10。图 10 中，破坏点取的是最先达到极限应力的点，屈服点位置按照双线性方法得到。采用双线性方法确定弹性界限（屈服点）位置的方法由 Tavenas 提出^[19]，Prashant 将其应用于高岭土真三轴试验中应用^[20]。该方法假设屈服点前后应力-应变关系为斜率不同的线性关系，斜率突变点就是屈服点所在位置。如图所示，洛德角为 45°时试样初始弹性部分刚度相对最小，60°时最大，而其余角度初始刚度大小相近；土体屈服和破坏点对应的 ε_d 值随

着洛德角的增大有所下降趋势。

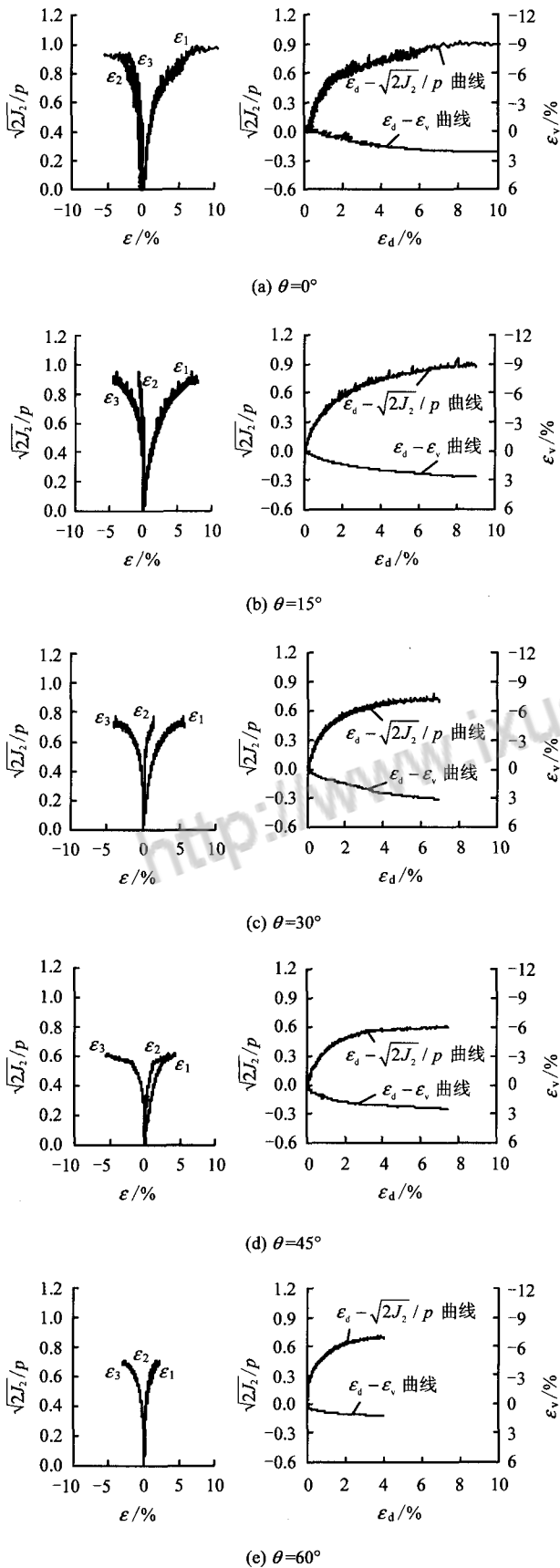


图 9 不同洛德角剪切试验结果曲线

Fig.9 Results of shear tests under different Lode angles

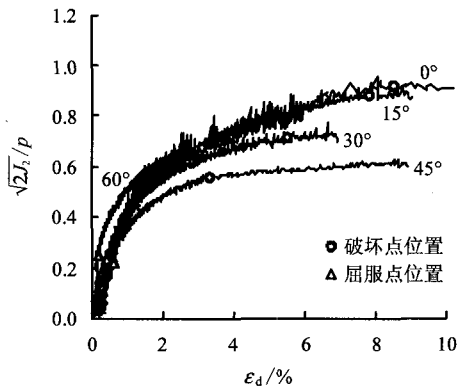


图 10 各个洛德角 $\epsilon_d - \sigma_s$ 曲线上屈服点与破坏点位置
Fig.10 Yield & failure points under different Lode angles on $\epsilon_d - \sigma_s$ curves

如图 11 所示，体积变化量与洛德角间基本有着先增大后减小的趋势；在 30° 时体变达到峰值。初始阶段体变速度随着洛德角的增大而增大。上海原状软土 π 面上破坏面见图 12。

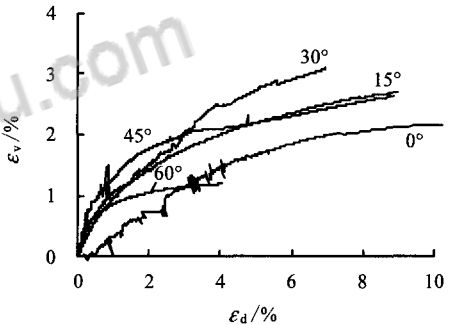


图 11 各个洛德角剪切试验对应体变曲线
Fig.11 Curves of volume change under different Lode angles

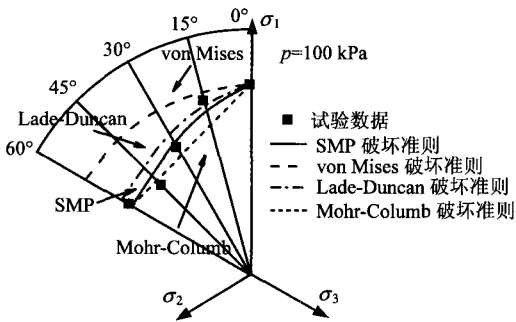


图 12 原状上海软土破坏面
Fig.12 Failure surface of natural Shanghai soft clay

图 12 中，各个洛德角下极限强度采用归一化强度参数 σ_s/p 。可以看出，上海原状软土在三向应力状态下破坏面与实际工程数值模拟中常用的剑桥模型、Drucker-Prager 模型所用的 von Mises 破坏准则有明显的不同。与 Mohr-Coulomb 准则和 Lade-Duncan 准则相比，试验数据与 Nakai 和 Matsuoka 提出的空间滑移面（SMP）破坏准则^[4]较为接近，

但还是有一定出入。这可能与上海原状软土的初始沉积各向异性有关, 作者拟对此进行进一步研究。

5 结 论

(1) 设计了一种自动控制刚柔复合真三轴仪, 围压室采用类似 Nakai 真三轴仪围压室结构, 解决了刚性板相互顶托问题, 而且结构简洁稳定, 有利于长时间的黏土固结排水剪切试验。

(2) 上海原状软土的抗剪强度基本随着洛德角从 $0^\circ \sim 60^\circ$ 增大而逐步减小; 体变量在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内逐渐增大, 而在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 区间内随着洛德角增大而减小。

(3) 土体破坏点对应剪应变值随洛德角增大而逐渐减少, 屈服点对应的剪应变值也有相同趋势。

(4) 上海原状软土在 π 面上破坏面形状与空间滑移面 (SMP) 破坏准则比较相近, 但还是有一定出入, 可能与原状软土中存在的初始各向异性和不同洛德角剪切面与土体天然沉积面的夹角有关。

参 考 文 献

- [1] YONG R N, MCKYES, E. Yield and failure of a clay under triaxial stresses[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, 1971, 97(1): 159—176.
- [2] LADE P V, WANG Q. Analysis of shear banding in true triaxial tests on sand[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2001, 128(8): 762—768.
- [3] KIRKGARD M M, LADE P V. Anisotropic three-dimensional behavior of a normally consolidated clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1993, 30(5): 848—858.
- [4] NAKAI T, MATSUOKA H, OKUNO N, et al. True triaxial tests on normally consolidated clay and analysis of the observed shear behavior using elastoplastic constitutive models[J]. **Soils and Foundations**, 1986, 26(4): 67—78.
- [5] CALLISTO L, CALABRESI G. Mechanical behavior of a natural soft clay[J]. **Geotechnique**, 1998, 48(4): 495—513.
- [6] PRASHANT A, PENUMADU D. Effect of overconsolidation and anisotropy of kaolin clay using true triaxial testing[J]. **Soils and Foundations**, 2005, 45(3): 71—82.
- [7] 李广信. 土的三维本构关系探讨与模型验证[博士学位论文 D]. 北京: 清华大学, 1985.
- [8] 朱俊高, 卢海华, 殷宗泽. 土体侧向变形性状的真三轴试验研究[J]. **河海大学学报**, 1995, 23(6): 28—33.
ZHU Jun-gao, LU Hai-hua, YIN Zong-ze. Lateral deformation of soil in true triaxial test[J]. **Journal of Hohai University**, 1995, 23(6): 28—33.
- [9] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. **岩土工程学报**, 2009, 31(8): 1172—1179.
- SHAO Sheng-jun, LUO Ai-zhong, DENG Guo-hua, et al. Development of a new true tri-axial apparatus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(8): 1172—1179.
- [10] YIN JIANHUA, CHENG CHUNMAN, KUMRUZZAMAN M, et al. New mixed boundary, true triaxial loading device for testing three-dimensional stress-strain-strength behavior of geomaterials[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2010, 47(24): 1—15.
- [11] 袁聚云, 赵锡宏, 杨熙章, 等. 真三轴仪的研制及其试验方法[J]. **大坝观测与土工测试**, 1992, 16(5): 8—12.
YUAN Ju-yun, ZHAO Xi-hong, YANG Xi-zhang, et al. Development of cubical triaxial apparatus and its test methods[J]. **Dam Observation and Geotechnical Tests**, 1992, 16(5): 8—12.
- [12] 赵锡宏, 姜宏伟, 袁聚云, 等. 上海软土各向异性弹塑性模型[J]. **岩土力学**, 2003, 24(3): 322—330.
ZHAO Xi-hong, JIANG Hong-wei, YUAN Ju-yun, et al. Anisotropically elastoplastic model of Shanghai soft soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 322—330.
- [13] AIREY D W, WOOD D M. The Cambridge true triaxial apparatus[C]//Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock. Philadelphia: American Society for Testing Material, 1988: 796—805.
- [14] STURE S, DESAI C S. Fluid cushion truly triaxial or multiaxial testing device[J]. **Geotechnical Testing Journal**, 1979, 2(1): 20—33.
- [15] KO H Y, SCOTT R F. A new soil testing apparatus[J]. **Geotechnique**, 1967, 17(1): 40—57.
- [16] 叶冠林, 盛佳初, 武朝军, 等. 自动控制真三轴仪的研制及验证[J]. **岩土工程学报**, 2011, 33(3): 380—385.
YE Guan-lin, SHENG Jia-ren, WU Chao-jun, et al. Design and verification of automatic true triaxial apparatus[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(3): 380—385.
- [17] LADE P V, DUNCAN J M. Cubical triaxial tests on cohesionless soil[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE**, 1973, 99(10): 793—812.
- [18] 殷宗泽, 王保田, 黄炜, 等. 一种新型真三轴仪[C]//中国第八届土力学及岩土工程学术会议. 北京: 科学出版社, 1999.
- [19] TAVENAS F, ROSIERS J P, LEROUÉIL S, etc. The use of strain energy as a yield and creep criterion for overconsolidation clays[J]. **Geotechnique**, 1979, 29(3): 285—303.
- [20] PRASHANT A, PENMADU D. Effect of overconsolidation and anisotropy of kaolin clay using true triaxial testing[J]. **Soils and Foundations**, 2005, 45(3): 71—82.



知网查重限时 **7折** 最高可优惠 **120元**

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
