

# 上海软土各向异性性状的试验研究<sup>\* \*\*</sup>

## EXPERIMENTAL STUDY ON ANISOTROPIC CHARACTERISTIC OF SHANGHAI SOFT CLAY

袁聚云 杨熙章 赵锡宏 董建国

Yuan Juyun, Yang Xizhang, Zhao Xihong, Dong Jianguo

(同济大学, 上海)

(Tongji University, Shanghai)

**【摘 要】** 对从工地现场取得的原状上海软土, 按与沉积面不同的倾角切取土样, 然后进行常规三轴固结排水剪切试验, 并利用真三轴仪对上海软土进行立方体试样等向固结试验, 从而对上海软土各向异性性状进行了研究和探讨; 还对上海软土各向异性的特性进行了微观分析, 将各种试验结果进行了对比分析。

**【关键词】** 上海软土 各向异性 固结 排水 剪切 真三轴仪 深基坑 轴向应变

### 1 前言

在上海, 软土的分布范围是很广泛的, 无论是建国初期的如上海展览中心等的大型建筑群, 还是近几年来拔地而起的高层建筑以及深基坑开挖等, 无一不涉及到上海软土。因此, 长期以来对上海软土工程性质及其工程应用的研究, 一直为工程技术界所重视, 并为此作了不懈的探索和努力<sup>[1~3]</sup>, 可是, 其中较少涉及到上海软土各向异性性状的研究。目前, 随着上海城市建设的不断发展, 不仅高层建筑越造越高, 同时基坑开挖也越来越深, 深基坑的开挖必然涉及到土的沉降及水平位移问题。以前在进行这方面设计和计算时, 大多将土体视为各向同性体, 而较少考虑土的各向异性。对目前情况而言, 上海地区深基坑开挖范围内所遇到的大多是淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土, 同时对于建筑物, 其沉降也主要是由这些软土所引起的, 因此有必要对上海地区典型软土的各向异性进行研究和探讨。

处于天然状态的土体在强度和变形方面一

般都表现为各向异性, 只是程度不同而已<sup>[4]</sup>, 对于具有各向异性的土体, 其强度和变形规律在土体各个方向必然是不同的。因而, 本文对上海软土各向异性性状的研究将通过二种试验方式进行, 一是将上海软土按照与沉积面不同的倾角切取试样, 然后进行常规三轴固结排水试验; 二是将上海软土切成立方体试样, 然后利用真三轴仪进行各向等压固结试验, 并将各种试验结果进行对比分析。

### 2 试验方法

文章中试验所用的土样取自上海地区有代表性的淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土<sup>[5]</sup>, 试验土样的基本物理力学性质见附表所示。

对于不同方向切取土样的常规三轴试验, 其试样直径为 3.91 cm, 高为 8 cm, 均从 108 直径的整筒原状土样中沿与沉积面三种不同的倾角  $\theta$  切取:  $0^\circ$  (重直方向)、 $45^\circ$  (斜方向) 和  $90^\circ$  (水平方向) 不同切土方向试验的试验均在常规三轴仪上进行, 所采用的试验方法为三轴固结排水剪切试验, 固结时间在 24 h 以上, 剪切采用等应变速率控制, 轴向应变速率为

\* 到稿时间: 1995-07-28

\*\* 国家自然科学基金资助项目

附表 试验土样的基本物理力学指标

土样名称	含水量 $w/\%$	容重 $\gamma/\text{kN}/\text{m}^3$	孔隙比 $e$	饱和度 $S_r/\%$	比重 $G$	塑性指数 $I_P$	液性指数 $I_L$
淤泥质粉质粘土	42.8	17.9	1.178	99.2	2.73	15.0	1.44
淤泥质粘土	49.4	17.3	1.375	98.8	2.75	21.9	1.27

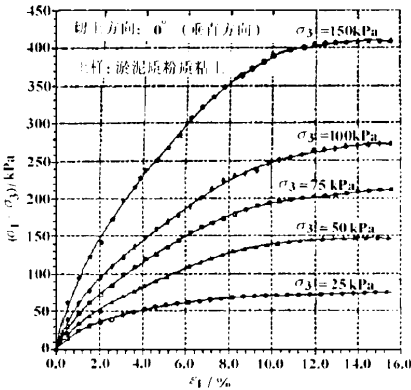


图 1 三轴排水剪切试验应力-应变关系

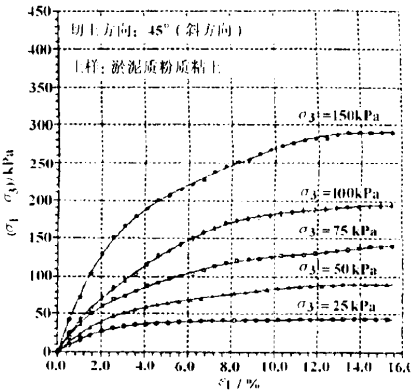


图 2 三轴排水剪切试验应力-应变关系

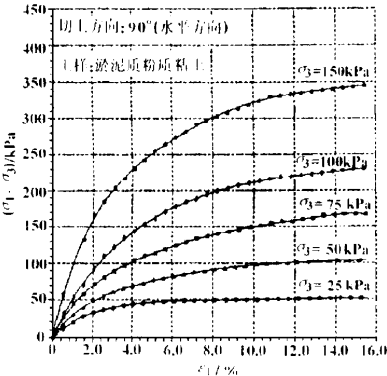


图 3 三轴排水剪切试验应力-应变关系

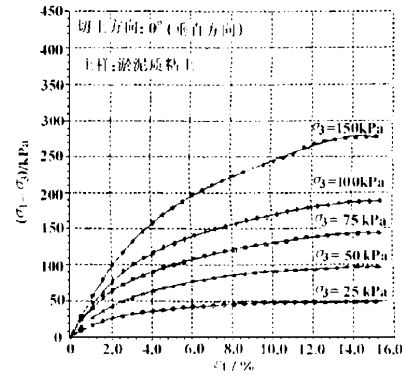


图 4 三轴排水剪切试验应力-应变关系

$1 \times 10^{-2} \%/ \text{min}$ 。

对于真三轴仪中立方体试样的各向等压固结试验，则用内壁尺寸 (cm) 为  $7 \times 7 \times 7$  的特制方形环刀垂直方向切取土样，并使土样成为完整的立方体试样，然后将立方体试样装入真三轴压力室内进行各向等压固结试验，每级压力稳定 2 h，同时观测立方体试样在各向等压固结条件下其各个方向的变形差异。

3 试验结果及分析

3.1 不同切土方向对土体强度的影响

图 9-4-2 所示是分别为淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土常规三轴固结排水剪切试验所得到

的应力-应变关系曲线。从图中可见，对于同一切土方向试样，淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土在破坏时的主应力差  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  均随着周围压力的增加而增加；无论是哪一种切土方向的试样，应力-应变曲线均呈加工硬化型，其硬化程度随着周围压力的增加而增加。

图 7~8 所示是以垂直方向试样强度为基准的不同切土方向试样强度随周围压力的变化情况。从图中可以看出，对于同一周围压力条件下，淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土都是垂直方向切土试样强度最高，水平方向次之，而  $45^\circ$  斜方向切土试样的强度则最小，从图中还可以看出，当周围压力增大时，不同方向切土试样

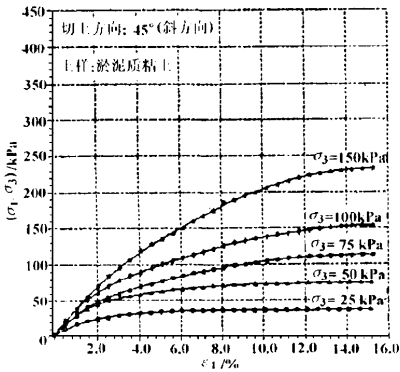


图 5 三轴排水剪切试验应力-应变关系

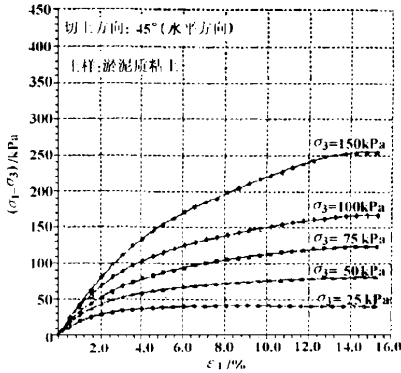


图 6 三轴排水剪切试验应力-应变关系

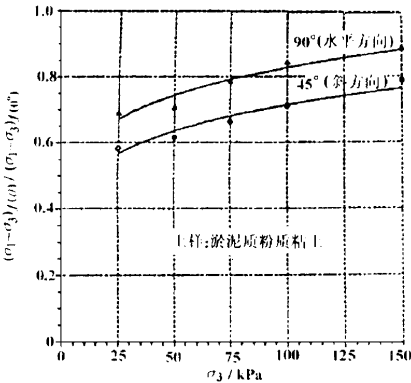


图 7 不同切土方向淤泥质粉质粘土三轴排水剪切试验强度与固结压力的关系

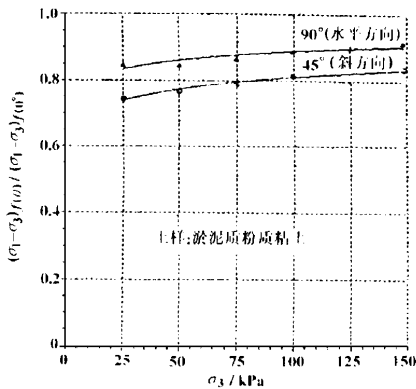


图 8 不同切土方向淤泥质粘土三轴排水剪切试验强度与固结压力的关系

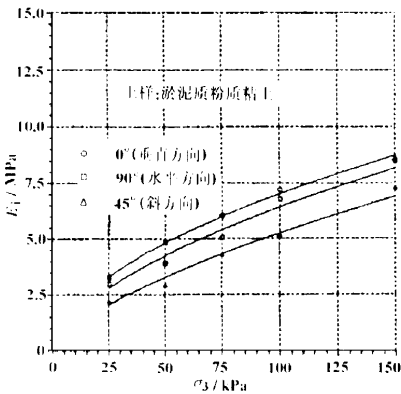


图 9 不同切土方向三轴排水剪切试验的初始切线模量与固结压力的关系(淤泥质粉质粘土)之间的强度差异有所减小。即随着周围压力增加,这类土结构上的各向异性可望得到一定程度上的消除。其原因在于原先土体中粘土颗粒

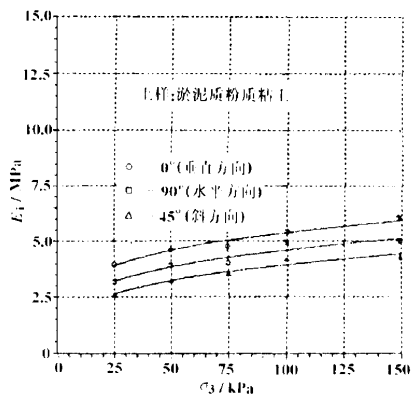


图 10 不同切土方向三轴排水剪切试验的初始切线模量与固结压力的关系(淤泥质粘土)的定向排列在各向等压应力条件下受到破坏,从而导致土体的各向异性在某种程度上得到改善所致。

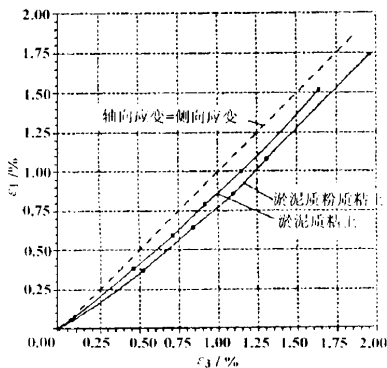


图 11 等向固结压缩试验中轴向应变与侧向应变的关系

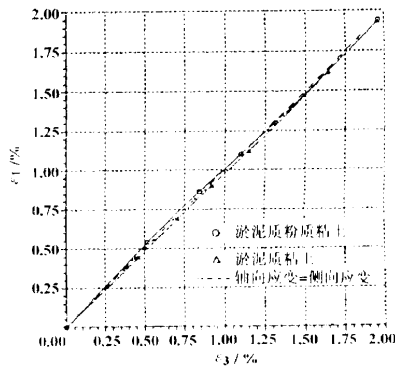


图 12 等向固结压缩试验中两侧向应变之间的关系

### 3.2 不同切土方向对土体初始切线模量的影响

图 9~10 所示是不同切土方向试样的初始切线模量  $E_t$  随周围压力的变化情况。从图中可以看出,对于同一周围压力,淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土都是垂直方向初始切线模量  $E_t$  最大,水平方向次之,而  $45^\circ$  斜方向的初始切线模量  $E_t$  则为最小;对于同一切土方向试样,其初始切线模量  $E_t$  随着周围压力的增加而增加。

### 3.3 立方体试样在各向等压固结条件下其各个方向的变形差异

图 11 所示是立方体试样在不同的各向等压固结条件下轴向应变与侧向应变之间的关系。从图中可见,在各向等压的作用下,淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土的水平向压缩变形均大于竖向压缩变形,但对其程度来说,淤泥质粉质粘土要比淤泥质粘土来得大,这说明淤泥质粉质粘土的各向异性程度要比淤泥质粘土来得大。随着固结压力增大,两种试样的轴向应变与侧向应变逐渐在接近,这表明,当固结压力增大时,土体的各向异性有减弱趋势。

图 12 所示是立方体试样各向等压固结试验所得到的两个侧方向应变之间的关系。从图中可以看到,淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土的两个侧方向应变基本相同,这表明,淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土在沉积面内基本上是横向各向同性的。

### 4 土体各向异性的微观分析

有关粘性土微观结构的研究表明<sup>[7]</sup>,大多数粘土颗粒是片状的,薄片厚度与宽度及长度相比极小。在沉积过程中,粘土颗粒相互碰撞,形成大的颗粒集合体,集合体中粘土颗粒相互之间的联接形式按相互接触的部位不同可分为边角-面、边角-边角和面-面三种不同接触形式,其中面-面连接是三者中最为弱的。对于薄片颗粒来说,其性能主要受各种表面力的影响,因而粘土颗粒在沉积过程中有一种倾向,即颗粒薄片面与沉积时的水平面相平行的倾向。此外,片状颗粒在沉积后的固结过程中,不等向应力的作用会促使粘土颗粒呈一定方向的排列,一些边角-面和边角-边角的连接方式可能被逐渐破坏,并形成面-面接触,从而使粘土颗粒的排列方向与力的作用方向相垂直。

根据以上对粘性土的组构和接触方式的分析可知,在沉积面内,主要是以面-面接触方式为主,其连接最弱。在三轴剪切试验过程中,当垂直方向切取试样时,大主应力的作用方向与沉积面相垂直,其剪切破坏面和沉积面成  $(45^\circ + \varphi/2)$ ;当水平方向切土时,大主应力作用方向与沉积面相平行,其剪切破坏面和沉积面成  $(45^\circ - \varphi/2)$ ;当  $45^\circ$  斜方向切取土样时,大主应力作用方向与沉积面成  $45^\circ$ ,则其剪切破坏面和沉积面成  $(\varphi/2)$ 。All rights reserved. <http://www.>

三种切土方向土样在三轴剪切试验时的剪

切破坏面与沉积面的夹角  $\alpha$  是不相同的, 一般而言, 土的内摩擦角  $\varphi < 45^\circ$ , 则垂直方向切土试样的剪切破坏面与沉积面的夹角最大, 水平方向次之, 而  $45^\circ$  斜方向切土试样的剪切破坏面与沉积面的夹角最小, 即

$$(45^\circ + \varphi/2) > (45^\circ - \varphi/2) > (\varphi/2)$$

当剪切破坏面越与沉积面接近, 其抗剪能力就越弱, 这就是为什么垂直方向切土试样抗剪能力较强, 水平方向次之, 而  $45^\circ$  斜方向抗剪能力最弱的原因之一。

## 5 结论

文章对上海淤泥质粉质粘土和淤泥质粘土分别进行不同切土方向的常规三轴固结排水试验和真三轴仪中立方体试样的各向等压固结试验, 试验结果及分析表明:<sup>1)</sup>

(1) 上海软土是具有各向异性的, 但在沉积面内基本上是横向各向同性的。

(2) 上海软土的应力-应变关系曲线均呈加工硬化型, 其硬化程度随着周围压力的增加而增加。

(3) 上海软土的垂直方向的强度和模量均

1) 同济大学土工实验室陈文华工程师参加了本文中的部分试验工作, 在此谨表谢意。

(上接第 6 页)

充分发挥了土工织物的作用, 克服了土工织物拉伸起始阶段非弹性应变, 影响拉应力充分发挥的弱点, 观测资料表明该方法效果明显, 在施工中平均应变 4%, 施加了 3 kN/m 的预应力。

6.3 在加筋坝砌石体后铺设土工织物将坝基土包裹, 工程竣工后 15.5 个月实测坝体背部的土压力, 比不加筋时的土压力减少了 50%~80%, 效果较好。

6.4 观测资料表明, 埋设的土工织物, 在砌石体后 1.5~3.5 m 范围内, 应变较大, 两固定端较小。其原因: 一是与施工中先使土工织物两端固定上土, 然后中间上土的施工方法有关; 二是与坝岸整体稳定最小安全系数所对应的滑弧

要大于水平方向的强度和模量, 而  $45^\circ$  斜方向的强度和模量则最小。

(4) 上海软土在各向等压条件下的垂直方向压缩变形要小于水平方向的压缩变形。

(5) 上海淤泥质粉质粘土的各向异性程度要比淤泥质粘土的为大。

## 参 考 文 献

- 1 朱良模, 翁显达. 上海地区软粘土的物理力学性质指标间相关关系的探讨. 第一届土力学及基础工程学术会议论文选集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1964
- 2 高大钊, 魏道琛. 上海软土工程性质概率统计特征. 第四届土力学及基础工程学术会议论文选集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986
- 3 高大钊主编. 软土地基理论与实践. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992
- 4 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. 同济大学博士论文, 1995
- 5 袁聚云, 张雷. 上海闵行联合发展有限公司 TD9 商品厂房工程地质详勘报告. 同济大学建筑设计研究院勘察分院, 1994
- 6 Ladd C C, Foott R & Ishihara K. Stress-deformation and strength characteristics: State-of-the-Art Reports, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, 1977
- 7 Mitchell J K. Fundamentals of Soil Behaviour. John Wiley & Sons Inc. 1979

半径处相吻合。

6.5 加筋坝是结合旧坝拆改进行的, 虽然增加了开挖、回填土方工程量, 但由于减小了砌石坝体厚度, 故成本略低于未加筋坝, 如果新建坝岸使用土工织物加筋土将会更经济。综上所述, 在黄河险工坝岸加高改建中使用土工织物加筋土新技术是可行的, 经济上是合理的。

## 参 考 文 献

- 1 李祚漠, 李希宁. 险工坝岸应用土工织物新技术提高稳定性的分析. 山东水利科技, 1992, (1)
- 2 山东黄河河务局. 山东黄河志. 1988
- 3 全国加筋土工程情报网. 全国加筋土工程情报网第四届全国加筋土工程学术研讨会论文集. 重庆: 1994