

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0088

万胜,甘建军,李荐华. 鄱阳湖区软土三轴剪切强度试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(4): 202-208. WANG S, GAN J J, LI J H. Experiment on triaxial shear strength of soft soil in Poyang Lake area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 202-208. (in Chinese)

## 鄱阳湖区软土三轴剪切强度试验

万胜<sup>1</sup>, 甘建军<sup>2</sup>, 李荐华<sup>1</sup>

(1. 江西省水利规划设计院 江西省水工结构工程技术研究中心, 南昌, 330029;

2. 南昌工程学院 鄱阳湖流域水工程安全与资源高效利用国家地方联合工程实验室, 南昌 330099)

**摘要:**为研究复杂应力条件下湖相软土的力学性质及破坏规律,对鄱阳湖区典型软土进行等加载速率(0.01 mm/min)下,基质吸力分别为0、50、100、200 kPa,净围压为100、200、300 kPa的标准应力途径GDS三轴剪切试验,得到湖相软土的三轴剪切应力-应变曲线、基质吸力与偏应力的关系、围压与偏应力的关系,并根据Fredlund双应力变量强度理论分析鄱阳湖区软土在不同基质吸力、不同围压下的土体抗剪强度变化规律。结果表明:在相同基质吸力条件下,鄱阳湖区软土非饱和强度在低应变范围内(<8%),抗剪强度随着应变的快速增加,在高应变范围内,强度增速放缓;在相同围压条件下,强度与吸力基本呈正相关线性关系,其基质吸力相关角为6.6°,处于低吸力范围内;在4种基质吸力条件下,其内摩擦角的范围为21.8°~26.2°,总黏聚力范围为16.7~44.4 kPa。结合双应力变量强度理论,提出鄱阳湖区湖相土的抗强度理论公式。

**关键词:**软土;鄱阳湖区;三轴剪切试验;强度;GDS试验

中图分类号:TV221.2 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



### Experiment on triaxial shear strength of soft soil in Poyang Lake area

WAN Sheng<sup>1</sup>, GAN Jianjun<sup>2</sup>, LI Jianhua<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Provincial Provincial Water Conservancy Planning and Designing Institute, Jiangxi Hydraulic Structure Engineering Technology Research Center, Nanchang 330029, China; 2. National-Local Joint Engineering Laboratory of Water Engineering Safety and Efficient Utilization of Resources in Poyang Lake Watershed, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

**Abstract:** In order to study the mechanical properties and failure laws of lacustrine soft soil under complex stress conditions, constant loading rate (0.01 mm/min) GDS triaxial shear tests were carried out for typical soft soil in Poyang lake area at four matrix suctions (0, 50, 100 and 200 kPa) and three net confining pressures (100, 200 and 300 kPa). Triaxial shear stress and strain curves of lacustrine soft soil, the relationship between matrix suction and deviatoric stress, and the relationship between confining pressure and deviatoric stress were obtained. The shear strength of Poyang lake soft soil under different matrix suction and confining pressure was analyzed based on Fredlund's two-stress variable strength theory of unsaturated soil. The results showed that: under the same matrix suction condition, the shear strength increased rapidly with the strain when the unsaturated strength of Poyang lake soft soil was in the low strain range (<8%), but the strength growth slowdown in the high strain

收稿日期:2019-03-29 修回日期:2019-12-31 网络出版时间:2020-01-21

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20200120.1749.002.html>

基金项目:江西省水利科技项目(KT201635);江西省科技厅第一批科技计划项目(20161BBG70051);江西省教育厅科技研究项目(GJJ151124);国家自然科学基金项目(4164102)

作者简介:万胜(1968—),男,江西永新人,高级工程师,主要从事软土工程特性研究。E-mail:1211927270@qq.com

通信作者:甘建军(1975—),男,江西永新人,讲师,博士,主要从事岩土工程及软土特性研究。E-mail:ganjianjun@nit.edu.cn

range, under the same confining pressure condition, the intensity was positively related with to the suction basic linear relationship, and the related matrix suction angle was  $6.6^\circ$  which was within the low suction range; under the condition of four kinds of matrix suction, the scope of its internal friction angle was a range from  $21.8^\circ$  to  $26.2^\circ$ . The total cohesive force range was  $16.7\sim 44.4$  kPa. Combined with the strength theory of the double stress variable, the strength theory formula of lacustrine soil in the Poyang lake area was proposed.

**Key words:** soft clay; Poyang lake area; triaxial shear test; strength; GDS test

湖相软土在江西省鄱阳湖区广泛分布。由于沉积历史、地下水位变化的影响,这些软土多数为非饱和土<sup>[1]</sup>。以往的学者<sup>[2-4]</sup>对滨海相、沼泽相非饱和软土研究较深入,上海、天津、珠海等地还形成了一些地方规范或规定,虽然利用地方经验可以解决一些软土工程问题,但对于局部的湖相沉积区域和河湖交互沉积作用区域,滨海相软土的强度参数不再适用。利用非饱和土的三轴抗剪试验可以通过设定不同的围压来模拟不同深度软土的应力环境。目前,它已成为研究非饱和软土剪切变形问题的重要手段之一。早期学者们<sup>[4-5]</sup>多采用直剪试验或常规三轴试验来分析不同围压的剪切特性,但对于有结构面的土,剪切面是固定的。GDS 三轴试验可以设定基质吸力及应力路径以符合现实工况,可以更好地研究非饱和软土的强度问题<sup>[6-7]</sup>。

目前,学者们提出了多种方法来提高三轴试验的效率。一种方法是通过采用可控吸力的非饱和三轴仪来改变基质吸力的控制方法,从而减少试验误差,提高参数精度,但三轴试验施加的中间应力和最小主应力是轴对称的,未能反映实际工程中的近似平面问题<sup>[8-9]</sup>。另一些方法则是通过非饱和土的剪切强度理论改进,探索 3 个有效主应力及参数的计算方法。时雨等<sup>[10]</sup>通过开展复杂工况条件下三轴剪切试验,对某非饱和软土的三轴抗剪特性进行了深入分析。叶为民等<sup>[11]</sup>采用等加载速率对上海软土开展了三轴试验,提出了该地区的抗剪强度计算公式。Yin 等<sup>[12]</sup>采用恒加载速率和蠕变三轴试验,基于各向异性的概念,提出了一种新的软土弹性模型,并对模型参数进行了讨论。周文渊等<sup>[13]</sup>通过蠕变试验和理论分析,研究了珠江三角洲软土的时空变形效应和工程特性。由于鄱阳湖区每年水位变化大,并在汛期受长江水倒灌沉积的影响,具有河湖相交交互沉积的特征,因此,鄱阳湖区软土的抗剪强度与气候、洪泛、成因历史密切相关,以往软土研究多针对的是滨海相软土,不能解释河湖交互沉积或地下水位变化引起湖相软土强度特性<sup>[14]</sup>。

通过在浅表层新软土采用低基质吸力和低围压,深层软土采用高基质吸力、高围压的方法,减少试验误差,从软土受力历史出发,基于力学条件一致,建立控制基质吸力条件下的三轴试验。同时根据非饱和土的双应力强度理论,分析湖相软土的强度参数,使各区域受力学性质一致,以达到与实际工况相符的效果,并通过强度理论分析,提出研究区软土抗剪强度计算公式,为湖相软土的工程特性研究提供依据。

## 1 鄱阳湖区软土空间特征

鄱阳湖是中国最大的淡水湖。近年来,鄱阳湖水位变化均在 10 m 左右浮动,早期湖水经湖口县流入长江,汛期长江水从湖口县倒灌入鄱阳湖,加之近 300 年来的围堤造田运动,使区内软土类型众多,常见的有主要有河床相、湖相、三角洲相和沼泽相<sup>[15]</sup>。为研究鄱阳湖软土的力学参数变化规律,选取具有代表性意义的河湖交互相互深厚软土开展了 DMAX-3C 衍射分析(CuKa, Ni)、常规试验和十字板剪切试验等一系列试验,如表 1 所示,从浅部到深部划分为  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  地层,软土主要分布在  $Z_2$  和  $Z_4$  地层中,厚度分别为 8.2、4.3 m。软土主要分为两层:第一层软土为淤泥质土,埋深在土层 0.5~8.7 m,上覆砂壤土,下伏粉细砂;第二层软土为夹砂

表 1 鄱阳湖区典型土层的工程地质分层

Tab. 1 Engineering geological stratification of typical soil layers in Poyang Lake area

分层	土类	深度/m	透水性
①-1	砂壤土	$0\sim\leq 0.5$	弱透土层
①-2	淤泥质黏土	$>0.5\sim\leq 8.7$	弱透土层
①-3	粉细砂	$>8.7\sim\leq 13.2$	含水层
②-1	淤泥质黏土	$>13.2\sim\leq 17.5$	弱透土层
②-2	卵石、黏土质砾石	$>17.5\sim\leq 32.5$	含水层
③-1	黏土	$>32.5\sim\leq 41.0$	微透土层
③-1	黏土质砾石	$>41.0\sim\leq 52.0$	含水层
④-1	灰岩	$>52.2\sim\leq 55.6$	不透土层
③-2	黏土质砾石	$>55.6\sim\leq 57.6$	含水层

淤泥质土,埋深 13.2~17.5 m,下伏为中粗砂和卵石层。为研究软土工程特性,选取 0~17.5 m 中的

软土试样进行分析,主要物理指标随深度变化试验结果见图 1。

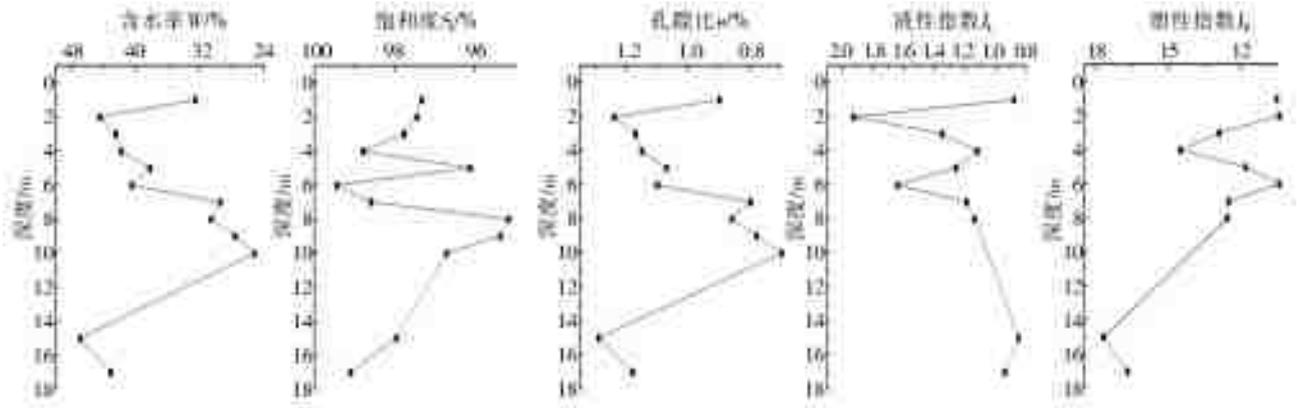


图 1 研究区典型软土主要物性指标与深度关系曲线

Fig. 1 Relationship curve between main physical property indexes and depth of typical soft soil in the study area

从图 1 中可以看出,研究区  $W$ 、 $S_r$ 、 $e$ 、 $I_P$  和  $I_L$  均与深度的加深呈非线性变化,具有空间变异性,表明其相关性较低,反映了软土复杂的成因历史和受力环境,因此软土的强度试验应综合考虑这些因素,利用双应力状态变量的非饱和强度理论,合理设置基质吸力的大小及相应的应力路径开展研究湖相软土的试验研究。

## 2 强度理论与试验设计

通过对鄱阳湖区 130 钻孔资料的试验数据统计分析,获得鄱阳湖区软土的含水率均在 40.16%,因此鄱阳湖区软土基本属于非饱和土。由于软土孔隙气压力  $u_a$  和负孔隙水压力  $u_w$  之间可能存在一定的差值,即基质吸力  $u_a - u_w$ ,它可以使土颗粒之间的有效应力不仅由颗粒骨架的粒间压力单独承担。对于非饱和软土的抗剪强度理论,可以采用 Fredlund(1978)提出的非饱和土双应力变量抗剪强度公式<sup>[16-18]</sup>为

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan(\phi') + (u_a - u_w) \tan(\phi^b) \quad (1)$$

式(1)中: $\tau_f$  为非饱和土抗剪强度; $c'$  为饱和状态下的有效黏聚力; $\phi'$  为饱和状态下的有效内摩擦角; $(\sigma - u_a)$  为净围压; $\phi^b$  为吸力相关角。

需要指出的是:式(1)充分考虑了  $\tau_f$  与  $c'$ 、 $(\sigma - u_a)$ 、 $(u_a - u_w)$  的相关性,这些参数可利用设置不同工况下吸力条件开展对应三轴试验、直剪试验来获得。 $\phi'$  值一般利用试验所获得的  $(\sigma - u_a)$  与抗剪强度  $\tau$  之间的关系曲线,测出曲线的斜率即为  $\tan \phi'$ ,从而求出  $\phi'$  值; $\phi^b$  则一般通过作出  $(u_a - u_w)$  与  $\tau$  的关系曲线,可得到该曲线的斜率  $\tan \phi^b$ 。本文依据此方法,进行鄱阳湖区典型软土试样开展 GDS 三轴试验,设置 4 种不同基质吸力来研究其三轴抗剪强度。

### 2.1 试验土样

鄱阳湖水利枢纽上闸址在 130 个钻孔中都可见到灰褐色淤泥质软土。考虑到软土上部、下部的软土在取样过程中受到扰动程度比较大的特点,利用环刀法在扰动较少的②-1 地层土样中部开展物理力学性质室内试验,结果见表 2。

表 2 软土物理性质指标

Tab. 2 Physical property index of soft soil

含水率/%	湿密度/(g·cm <sup>3</sup> )	干密度/(g·cm <sup>3</sup> )	孔隙比 $e$	塑限 $W_p$ /%	液限 $W_L$ /%	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 $\phi$ /°	压缩模量 $E_s$ /MPa
40.16	1.78	1.24	1.18	44.7	36.6	25.3	1.9	2.62

试样制作为半径 19 mm、高度 76 mm 的圆柱体重塑土样,制样以干密度达到 1.24 g/cm<sup>3</sup> 来控制试样土的用量。固结试验前先把试样用真空饱和器抽气后浸入密封水桶中 24 h 使其达到饱和,试验的方式用排水抗剪强度(CD)。试验控制净围压 100、200 和 300 kPa,基质吸力分别为 0(非饱和土的特殊工况)、50、100 和 200 kPa,共开展 12 组试验。

### 2.2 试验方案

考虑到鄱阳湖软基工程主要为开挖换填或桩基施工,地下水位会随着工程排水而变化,基质吸力会在地下水位升降过程中发生变化,因此土体的剪切破坏主要是由于基坑开挖、地下水位变形所导致的基质吸力变化引起的。因此,利用等加载速率加载方式,设计出固结排水剪(CD)分别对应软土受剪切破坏变形破坏方式。试验采用 STDTAS-HKUST

三轴试验系统进行。试验固结时间  $t=72$  h,剪切速率  $v=0.01$  mm/min。具体试验方案见表 3。

表 3 试验软土试验方案

Tab. 3 Test plan of the soft soil

加载方式	试验方法	基质吸力 $U_s$ /kPa	围压 $\sigma$ /kPa	净围压 $(\sigma-u_a)$ /kPa	组号
剪切破坏(应力控制式)	固结排水剪(CD)	0	100,200,300	100,200,300	S-1
		50	150,250,350	100,200,300	S-2
		100	200,300,400	100,200,300	S-1
		200	300,400,500	100,200,300	S-1

非饱和软土工况以 S-2 组三轴试验方案来讲,该组模拟  $(u_a-u_w)$  为 50 kPa,  $(\sigma-u_a)$  分别设定在 100、200、300 kPa 的受荷工况,鉴于固结排水剪,利用 GDSLAB 软件设置  $u_w=0$  kPa,  $u_a=50$  kPa,法向应力  $(\sigma-u_a)$  分别设置 100、200、300 kPa,等饱和度 B 检测达到 0.95% 以上后开展等加载速率固结试验。试验停止依据每 2 h 的压缩量小于或等于 0.01 mm;排水的稳定标准为每 2 h 的排水量不超过 0.012 mm<sup>3</sup>;排水及轴向位移都稳定表示固结完成。其他吸力条

件下操作与 S-2 组相同。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 吸力为定值工况下的抗剪强度

基质吸力  $(u_a-u_w)$  一定时,不同轴压  $\sigma_1$  固结作用下软土的  $(\tau-\epsilon_a)$  关系曲线见图 2。其中图 2(a)至图 2(e)是基质吸力分别为 0、50、100、200 kPa 时,在  $(\sigma-u_a)$  分别为 100、200、300 kPa 对应条件下  $(\tau-\epsilon_a)$  关系曲线。

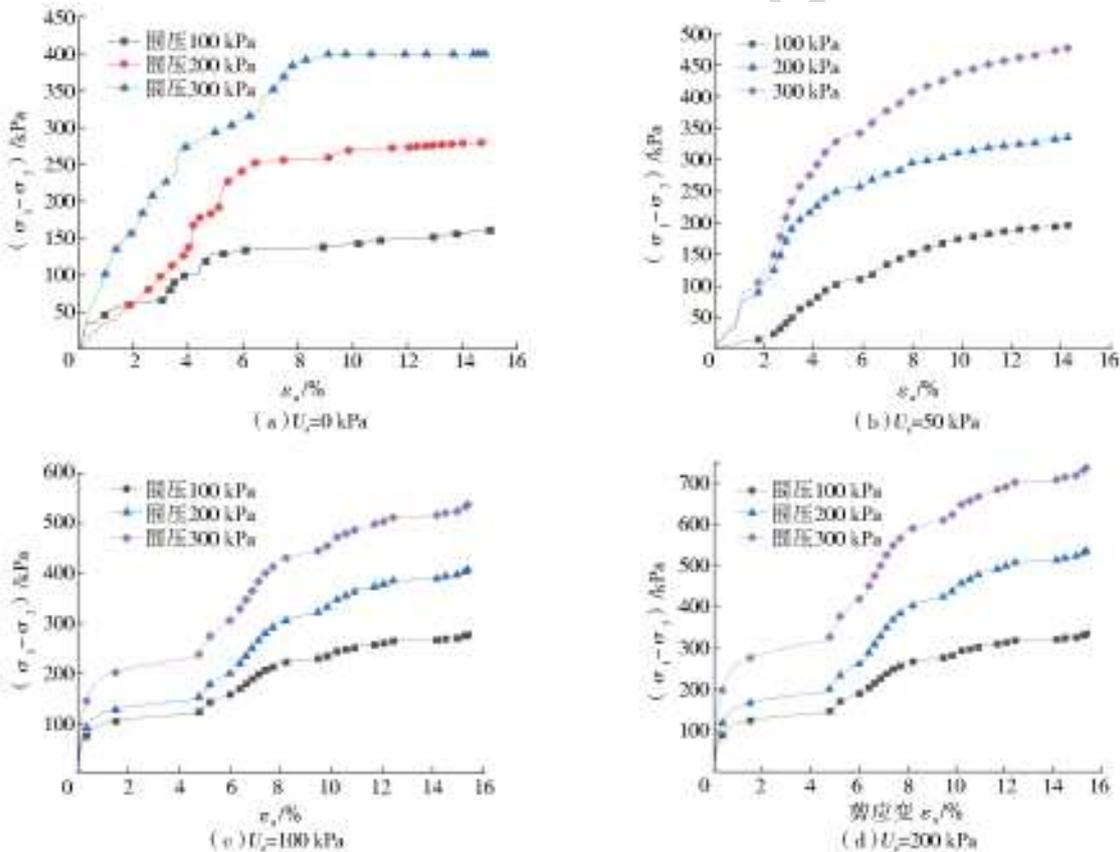


图 2 基质吸力为定值时的偏应力-应变曲线

Fig. 2 Curve of shear stress and deformation when the matric suction was constant

由图 2 可知,在吸力为定值的情况下,  $\tau$  与  $(\sigma-u_a)$  呈正相关,鄱阳湖湖相软土偏应力-应变关系曲线在垂直应变  $\epsilon_a < 15\%$  时斜率较大,说明其在刚开始变形时强度增大较快。当垂直应变  $\epsilon_a \geq 8\%$  以后,抗剪强度缓慢增长速度减缓,土体在一定的强度作用下持续发生变形。在低基质吸力条件,湖相软土

具有蠕变特征,而在高基质吸力条件,软土具有一定的硬化特征。

由图 2(a)可见,基质吸力为 0 kPa 时,当垂直应变  $\epsilon_a \leq 8\%$  时,偏应力-应变关系曲线近似于斜直线,当垂直应变  $\epsilon_a > 8\%$  时,偏应力-应变关系曲线为由曲线向近似水平直线转变,表明其由塑性变形转为

蠕变;而图 2(b)–2(d)中分别是其他 3 种吸力条件的偏应力-应变关系曲线,它们都存在当垂直应变  $\epsilon_a \leq 8\%$  时,抗剪强度增长速度较快,而垂直应变  $\epsilon_a > 8\%$  时,抗剪强度增长速度放缓;基质吸力越大时,达到相同应变所抗剪强度(偏应力)越大。

### 3.2 净围压为定值工况下的抗剪强度

通过 GDS 三轴剪切试验,比较分析相同围压的抗剪强度,验证相同围压作用下不同基质吸力的应力-应变关系。试验结果见图 3。相同取样深度、相同饱和度、相同孔隙比,试样受到 3 种不同净围压  $\sigma - u_a$  试验结果表明,基质吸力  $U_s$  与抗剪强度  $\tau$  呈正相关,即吸力值越高,抗剪强度越大。

由图 3(a)可见:净围压为 100 kPa 时,湖相软土

垂直应变在初始加压阶段(约  $\epsilon_a \leq 4\%$ ) 范围内快速增长,主要为弹性变形阶段(直线型);加压的中后期阶段( $\epsilon_a > 4\%$ ) 进行缓慢变形阶段。湖相软土的偏应力( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 均与垂直应变  $\epsilon_a$  呈正相关。如图 3(b)可见:净围压为 200 kPa 时,湖相软土垂直应变在初始加压阶段(约  $\epsilon_a \leq 6\%$ ) 范围内快速增长;加压的中后期阶段( $\epsilon_a > 6\%$ ) 进行缓慢变形阶段。由图 3(c)可见:净围压为 300 kPa 时,湖相软土垂直应变在初始加压阶段(约  $\epsilon_a \leq 8\%$ ) 范围内快速增长,主要为弹性变形阶段(直线型);加压的中后期阶段( $\epsilon_a > 8\%$ ) 进行缓慢变形阶段。因此,总体上,低围压工况下弹性变形阶段对应的垂直应变相对较小,而高围压作用下弹性变形对应的垂直应变相对较大。

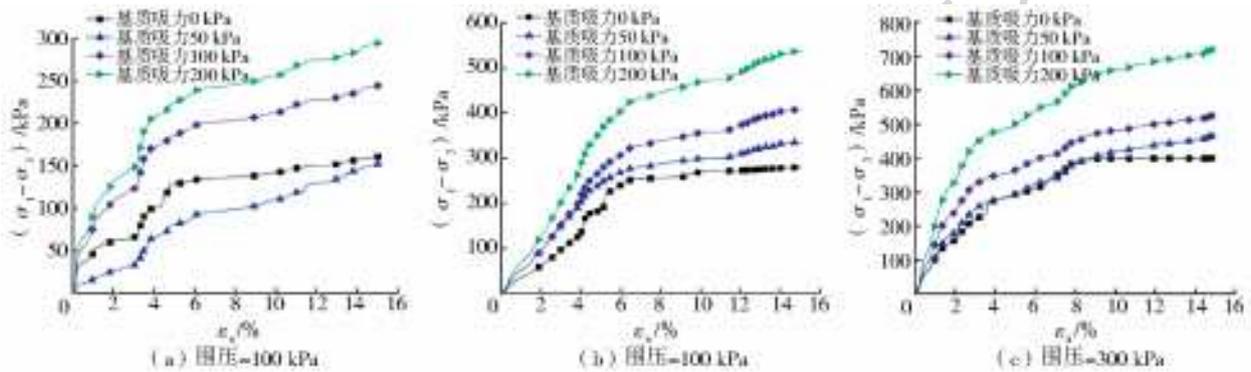


图 3 围压为定值时的偏应力-应变关系曲线

Fig. 3 Partial stress-strain curve with constant confining pressure

### 3.3 Fredlund 非饱和土强度理论分析

结合定吸力值和定围压工况下的试验分析结果和《土工试验规程》(SL 237—1999)等相关规定,选择垂直应变  $\epsilon_a \leq 15\%$  时偏应力( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 的峰值作为破坏点,选取其作为最大主应力  $\sigma_{1max}$ ,则可得到表 4 的三轴试验剪切参数。

表 4 鄱阳湖区湖相软土三轴试验剪切参数

Tab. 4 Triaxial test shear parameters of lacuvial soft soil in Poyang Lake 单位:kPa

样号	$U_s$	$\sigma_3$	$\sigma_3 - u_a$	$\sigma_{1max}$	$\sigma_{1max} - u_a$
S1-01	0	100	100	261.36	261.36
S1-02	0	200	200	480.23	480.23
S1-03	0	300	300	700.57	700.57
S2-01	50	150	100	348.08	398.08
S2-02	50	350	200	587.07	537.07
S2-03	50	350	300	849.59	119.59
S3-01	100	200	100	479.77	379.77
S3-02	100	300	200	710.05	610.05
S3-03	100	400	300	941.33	841.33
S4-01	200	300	100	637.07	437.07
S4-02	200	400	200	939.54	739.54
S4-03	200	500	300	1241.55	1041.55

依据上述鄱阳湖区软土 GDS 三轴剪切试验获得的数据,以  $(\sigma - \sigma_a)$  为横坐标,  $\tau$  为纵坐标,绘制出吸力为定值条件下 3 种不同净围压试验条件下的抗剪包络线;如图 4(a)–4(d) 所示,通过叠加此 4 个抗剪包络线,可以分析求得 4 种吸力工况下研究区软土的  $\phi$  值和  $c$  值。

从图 4 可以看出,在基质吸力为 0、50、100 和 200 kPa 时,其总黏聚力  $c$  分别为 16.7、25.6、31.4 和 44.4 kPa,内摩擦角  $\phi$  分别为 21.8°、23.6°、26.2° 和 24.5°。考虑到非饱和土双应力变量公式(1),先绘制出不同基质吸力( $u_w - u_a$ ) 与总黏聚力  $c$  的破坏包络线如图 5;再对该破坏包络线进行直线型拟合,该直线斜率即为  $\tan \phi'$ ,由此可求出基质吸力相关角  $\phi'$ 。由图 4 可知,  $\phi' = 21.8^\circ, c' = 16.7 \text{ kPa}, \phi'' = 6.6^\circ$ , 将这些参数代入式(1),可得

$$\tau_f = 16.7 + (\sigma - u_a) \tan(21.8^\circ) + (u_a - u_w) \tan(6.6^\circ) \quad (2)$$

综上所述:在基质吸力为定值时软土试样垂直应变与偏应力呈正相关,在剪应变接近 8% 时,偏应力-应变曲线的斜率变缓;在不同基质吸力作用下,均存在偏应力增加到某一定值,但应变一直在增大

的变化规律,说明已经发生剪切破坏。定围压作用下偏应力-应变关系曲线还表明,软土试样当基质吸力一定时,软土受剪切变形过程分为快速剪切和蠕

变两个阶段。反映三轴试验过程中,土体颗粒孔隙被挤压,空隙减小,压力越大,颗粒骨架之间的表面张力起到主导作用,阻止变形的力越大。

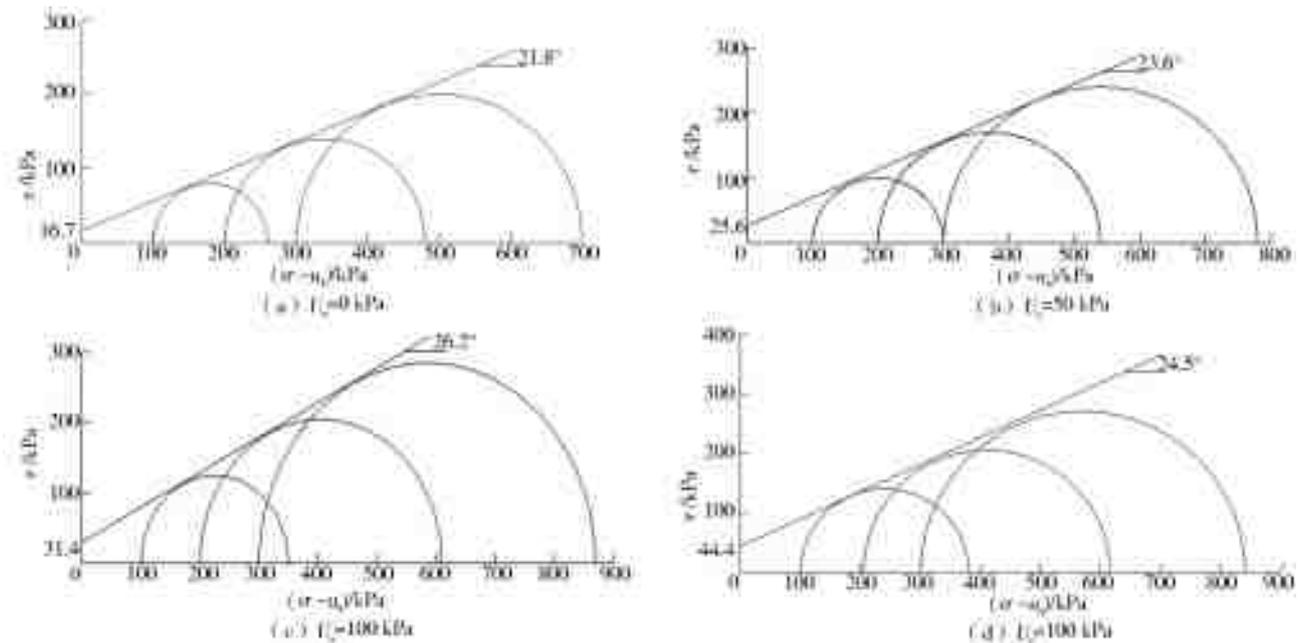


图4 各吸力条件的抗剪包络线

Fig. 4 The molar coulomb envelope diagram of different matrix suction

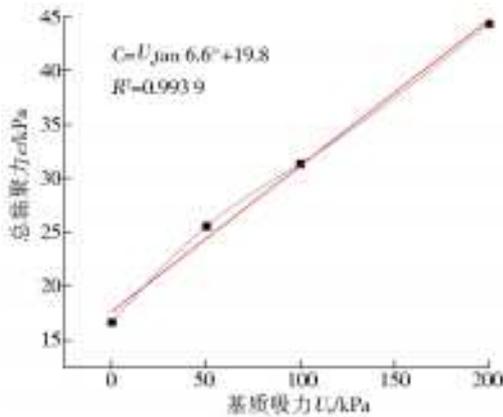


图5 鄱阳湖区典型软土破坏包络线

Fig. 5 The envelope of typical soft clay in Poyang Lake

#### 4 结论

(1) 鄱阳湖区软土的平均含水率为 40.16%, 具有非饱和土的特征; 在等加载速率和定吸力条件下, 鄱阳湖区软土偏应力与围压呈正相关, 即围压越大, 偏应力越大; 当土体饱和时, 垂直应变在  $\epsilon_a \leq 8\%$  阶段为弹性变形,  $\epsilon_a > 8\%$  阶段为塑性变形; 当基质吸力增大后, 抗剪强度均经历快速增长和缓慢增长两个阶段。

(2) 在相同基质吸力工况和等加载速率工况下, 鄱阳湖区软土抗剪强度与围压的呈正相关, 反映研究区软土埋藏深度或上部荷载的变化会对其抗剪强

度产生重大的影响。

(3) 根据 Fredlund 非饱和土强度理论, 研究区典型软土基质吸力为 0~200 kPa 时, 其内摩擦角为  $21.8^\circ \sim 26.2^\circ$ , 总黏聚力为 16.7~44.4 kPa, 共基质吸力相关角为  $\phi^b = 6.6^\circ$ , 处于低吸力范围内。

(4) 鄱阳湖区不同类型软土的基质吸力与工程特性对其抗剪强度的影响还有待于进一步研究。

#### 参考文献:

[1] KARLSRUD, K., HERNANDEZ F. G. Strength and deformation properties of Norwegian clays from laboratory tests on high-quality block samples[J]. Can. Geotech. J. 2013, 50(12), 1273-1293. DOI: <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0298>.

[2] 李雪刚, 徐日庆, 王兴陈, 等. 杭州地区海、湖相软土的工程特性评价[J]. 浙江大学学报, 2013, 47(8): 1346-1353. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2013.08.004.

[3] DUTTA S, MANDAL J N. Model studies on geocell-reinforced fly ash bed overlying soft clay[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(2): 04014091(13). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001356](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001356).

[4] WANG J F, LI Y L, GAO Y B, et al. Experimental study on structural properties influencing on shear strength of soft clay[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243: 2487-2490. DOI: <https://doi.org/10.4028/>

- www.scientific.net/AMR.243-249.2487.
- [5] MA H L, ZHOU M, HU Y X, et al. Interpretation of layer boundaries and shear strength for soft-stiff-soft clays using CPT data; LDFE analyses[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(1): 1-12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001370](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001370).
- [6] RATANANIKON W, YIMSIRI S, LIKITLERSUANG S. Underdrained shear strength of very soft to medium stiff Bangkok clay from various laboratory tests[J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 2015, 46(1): 64-75. DOI: <https://www.researchgate.net/publication/272484820>.
- [7] YIN Z Y, YIN J H, HUANG H W. Rate-dependent and long-term yield stress and strength of soft Wenzhou marine clay; experiments and modeling [J]. Marine Georesources & Online, 2015, 33(1): 79-91. DOI: <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.797060>.
- [8] SEAH T H, SANGTIAN N, CHAN I C. Vane shear behavior of soft Bangkok clay[J]. Geotechnique Testing Journal, ASTM, 2004, 27(1): 57-66. DOI: <https://doi.org/10.1520/GTJ11266J>.
- [9] SEAH T H, LAI K C. Strength and deformation behavior of soft Bangkok clay[J]. Geotechnical Testing Journal, ASTM, 2003, 26(4): 1-11. DOI: 10.1520/GTJ11260J.
- [10] 时雨, 周龙, 刘小文, 等. 基于 GDS 的非饱和红土强度三轴试验研究[J]. 南昌大学学报(工科版), 2015, 37(4): 361-35. DOI: 10.13764/j.cnki.ncdg.2015.04.010.
- [11] 叶为民, 陈宝, 卞祚麻 等. 上海软土的非饱和三轴强度[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 317-322.
- [12] YIN Z Y, YIN J H, HUNAG H W. Rate-dependent and long term yield stress and strength of sot Wenzhou marine clay experiments and modeling[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2015, 33(1): 70-91. DOI: <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.797060>.
- [13] 周文渊, 闪黎, 宋新江, 等. 等加载速率下软土固结特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(4): 695-699. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.04.019.
- [14] CAICEDO B, MENDOZA C, LOPEZ F, et al. Behavior of diatomaceous soil in lacustrine of Bogota, Colombia[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, 10(2): 367-379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.10.005>.
- [15] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100-111.
- [16] WANG Y K, GUO L, GAO Y F, et al. Anisotropic drained deformation behavior and shear strength of natural sot marine clay[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, 23(15): 493-502. DOI: <https://doi.org/10.1080/1064119X.2015.1081653>.
- [17] 陈超斌, 武朝军, 叶冠林, 等. 小应变三轴试验方法及其在上海软土的初步应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(S2): 37-41. DOI: 10.11779/CJGE2015S2008.
- [18] 陈能远, 孟庆山. 水位波动作用下软土的变形强度特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 165-170. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.04.019.

## Water and climate change(水与气候变化)

——联合国确定第二十八届“世界水日”主题

### 坚持节水优先 建设幸福河湖

——我国纪念第二十八届“世界水日”和第三十三届“中国水周”活动主题