

长江三角洲北岸软土的不排水强度特征研究

苟富刚^{1,2}, 龚绪龙^{1,2}, 王光亚^{1,2}, 翁志华^{1,2}

(1. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210049; 2. 国土资源部地裂缝地质灾害重点实验室, 江苏 南京 210049)

摘要: 采用三轴不固结不排水试验、无侧限抗压强度试验和快剪试验对长江三角洲北岸软土的不固结不排水剪切强度特征进行了研究。研究表明: 研究区软土为碱性环境下沉积的非均质海陆交互相软土, 软土剪切强度具有固有各向异性。土体制样采用垂直方向的切取试样方式, 采用三轴不固结不排水试验时, 土体沿 $45^\circ + \varphi_{\text{uns}}/2$ 这一椭圆形斜剪切面破坏, 研究区土体破裂面主要集中在 $45.5^\circ \sim 46.3^\circ$ 这一区间内。根据三轴不固结不排水试验得出的抗剪指标, 辅以土体单元极限平衡理论计算出了土体实际剪切强度。无侧限抗压强度试验测得的土体平均剪切强度小于三轴不固结不排水试验测得平均剪切强度, 这与研究区软土破坏时应力状态和摩擦强度较大有关。最后, 从软土颗粒组成、矿物成分活性、微观结构等方面解释了研究区软土抗剪强度较高的原因。

关键词: 软土; 剪切强度; 不排水强度; 三轴不固结不排水试验; 无侧限抗压强度试验; 长江三角洲北岸
中图分类号: TU411.7 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)03-0225-06

Undrained strength study of soft soil in the Yangtze River north shore

GOU Fugang^{1,2}, GONG Xulong^{1,2}, WANG Guangya^{1,2}, WENG Zhihua^{1,2}

(1. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China; 2. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210049, China)

Abstract: The unconsolidated - undrained shear strength of soft soil in the Yangtze river north shore were studied by three - axis non - consolidated undrained test, unconfined compressive strength test and quick shear test. The research results show that the soft soil in study area is the nonhomogeneous interactive marine soft soil deposited under the alkaline environment. Soft soil shear strength has inherent anisotropy. The soil system adopts a vertical cutting sample method, and the soil failure is along the $45^\circ + \varphi_{\text{uns}}/2$ oval oblique shear plane by three - axis non - consolidated undrained test. The sample fracture surface is most concentrated in the range of $45.5^\circ \sim 46.3^\circ$. Using shear index by three - axis non - consolidated undrained test, the actual shear strength of the soil was calculated with the soil unit limit equilibrium theory. Average strength obtained by unconfined compressive strength test is less than the average strength of three - axis non - consolidated undrained test. This phenomenon is related to the stress state of failure and large frictional strength in study area. It explains the reason of high shear strength of soft soil in terms of soft soil particle composition, mineral activity and microstructure.

Key words: soft soil; shear strength; undrained strength; unconsolidated undrained triaxial test; unconfined compression test; the Yangtze River north shore

1 研究背景

在江河入海口区域往往分布着海陆交互相软土层, 比如渤海湾、珠江口、长江口等区域均见分布^[1]。长江三角洲北岸(图1)沿深度分布两层软土^[2]。第二软土层顶板埋深 14.4 ~ 37.3 m, 平均层

厚 13.08 m; 第一软土层, 软土顶板埋深 2.2 ~ 3.6 m, 平均层厚 2.88 m。软土层(图2)沿深度不连续沉积, 多夹薄层粉砂、粉土, 空间变异特性明显。研究区软土具有一般软土的特点, 如高压缩性和抗剪强度低, 但与典型连云港地区海相软土相比, 研究区软土力学性质较好, 压缩模量平均值为连云港地区

收稿日期: 2017-11-29; 修回日期: 2018-02-01

基金项目: 中国地质调查局地质大调查项目(1212011220005); 国家自然科学基金项目(41772327)

作者简介: 苟富刚(1985-), 男, 陕西渭南人, 硕士, 工程师, 主要从事岩土力学、环境地质评价方面的研究工作。

海相软土的2倍。张宏等^[3]研究表明研究区软土具有物理性质偏差,力学性质偏好的现象。

软土地基稳定分析计算需要考虑稳定分析方法和抗剪强度指标两个方面,以往的研究表明,合理地选择抗剪强度指标比采用哪种稳定分析方法更为重要^[4-5]。软土渗透系数在 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/s这一数量级,具有排水条件差,且厚度大的特点,适合采用不排水剪。地下水位以下的黏性土、黏质粉土,可采用土压力、水压力合算方法;土压力计算和土的滑动稳定性验算可采用总应力法^[6-7]。

不固结不排水抗剪强度指标获取主要有3种方式:三轴UU(不固结不排水)试验、UTC(无侧限抗压强度)试验和直剪中的快剪^[8]。基于Mohr-Coulomb定律,UTC试验和三轴UU试验得到的剪切强度是相同的,但研究区软土两种试验方法得到剪切强度是不同的。Mitchell等^[9]、高彦斌等^[10]的研究表明软土强度具有各向异性,选择不同剪切方向,会得出不同的剪切强度,一般水平面(土体沉积接触面)剪切强度最低。

根据袁聚云等^[11]对上海软土各向异性的研究,也有类似规律。洪昌华等^[12]的研究表明土体是一种变异性很大的工程材料,就某一层土体来说,受勘察、取样、沉积条件、沉积历史和埋藏条件等多因素影响,试验得到的土体强度十分离散,因而土体不排水抗剪强度具有空间变异性,但对于统一地质单元体,土体各参数又具有一定的相关性,这种相关性是就土体的某一个测试指标而言,可描述为这一测试指标的自相关性。本文依托江苏沿海大调查项目,进行了大量不同方法的不排水剪切试验,可以基于数据统计分析来研究不同试验方法测得的软土不排水剪切强度。

目前研究区软土强度的获取主要依靠直剪试验中的快剪。吴燕开等^[13]采用快剪指标分析了第1层软土作为路基的稳定性。本文抗剪指标采用三轴UU试验、UTC试验获取两种方法获取软土强度参数,发现两种试验方法测得不排水强度不相等。但据作者基于数据统计分析,连云港典型海相软土两种方法是通用的。两种试验方法得出的剪切强度不同是由研究区软土沉积环境、颗粒组成和微观结构等多因素综合影响的。本文对3种方法获取的土体强度参数进行对比,得出土体破坏特征及各试验方法得出的强度指标异同原因,给岩土工程师在今后就某一具体工程地基稳定性计算选取抗剪指标提供参考。

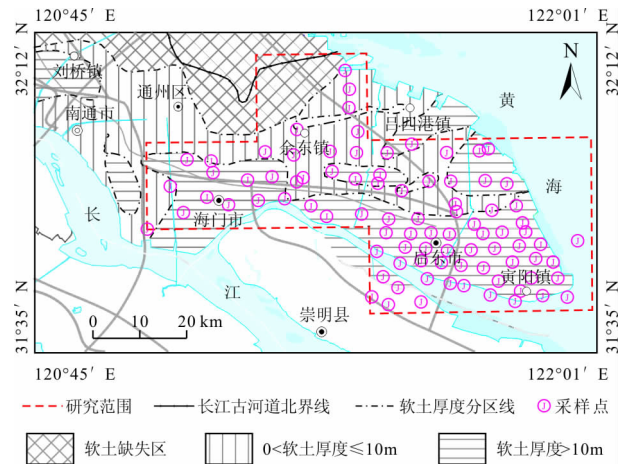
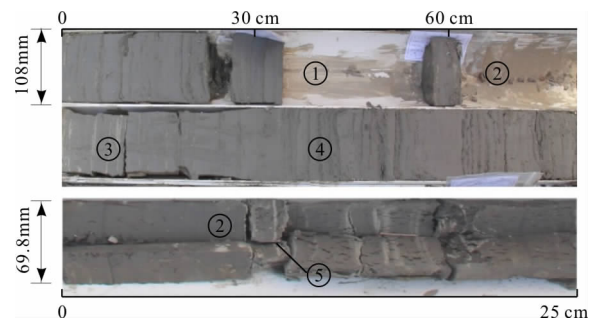


图1 研究区软土采样平面分布图

2 研究区软土沉积环境

土体力学性质与土体沉积环境密切相关^[13],查明研究区沉全新世沉积环境十分必要。由于长江属于潮汐河,受科氏力影响,落潮主流偏南,涨潮主流偏北,形成独特的伴生沉积体系,并使得岸线不断向南偏转,形成6个完整的亚三角洲^[14]。研究区在末次冰期低海面时,海平面下降130~150 m,长江基面下降,于古河谷内产生侵蚀面,古河道以北为滨海平原,以南为长江三角洲平原(图1)。在距今约8~11 ka B. P.,在全新世Q4早期,海进时主要细颗粒沉积,海退时主要为粗粒沉积,土体沉积受咸淡水混合时的凝聚作用,在古河谷内形成了一套广泛分布的冲海积软土层,即本文研究的第2软土层。在距今约3~8 ka B. P.,全新世中期,测区海平面逐渐上升至现今位置,同时长江流域泥沙量增加,岩性以青灰、黄灰色粉细砂层为主,局部夹深灰色软土层,即本文研究的第1层软土层。



注:①表示原状样取样位置;②表示标准贯入试验位置,③和⑤分别岩心和标贯试验中的薄层近水平粉土夹层,④表示近水平沉积层理。图中照片为108 mm的岩心和69.8 mm的标贯试样对称剖开后的切面。

图2 软土沉积层理

软土类型为灰—深灰色淤泥质土(包括淤泥质黏土和淤泥质粉质黏土),极少量的淤泥。基于数据统计(样本数 613 个),淤泥质粉质黏土约占软土总数的 82.22%,淤泥质黏土约占软土总数的 17.13%,淤泥仅约占软土总数的 0.65%。研究区

两层软,颗粒组成基本一致,塑性指数平均值都为 15.1,第 1 层软土液性指数和含水率均值稍高于第 2 层软土,第 1 层软土压缩性均值也稍高于第 2 层。第 2 层软土的物理力学特性见表 1。

表 1 第 2 层软土的物理力学特性

项 目	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	W/%	e_0	W_L /%	I_p /%	I_L	a_{1-2}/MPa^{-1}	E_s/MPa
最大值	37.30	84.10	41.80	55.30	1.56	43.4	19.8	1.95	1.16	6.87
最小值	0.00	41.70	15.20	31.00	1.00	29.1	10.1	1.00	0.31	2.12
平均值	2.04	71.55	26.41	39.51	1.13	35.9	15.1	1.24	0.66	3.35

3 样品采集及测试

为了获取研究区软土不固结不排水抗剪强度特征,布置工程钻孔 96 个,工程钻孔采样密度为 1.5~2.0m 采一个薄壁样。为了保证测试结果的准确性,样品分批及时配送,完成测试分析。

三轴 UU 试验采用 KTG 全自动三轴仪/WX064 完成,UTC 试验采用 YYW-2 应变控制式无侧限压力仪。快剪试验采用 DJY-3 四联等应变直剪仪。本文制样采用垂直方向的切取试样。

本文研究思路:由于土体的固有各向异性,土体各测试指标离散性较大,可借助数理统计的方法,揭示相同地质单元土体在不同测试方法下的抗剪强度特征特征(洪昌华等^[12])。本文进行软土三轴试验 89 组,无侧限抗压强度试验 132 组,快剪试验 289 组。为研究土体各指标之间的相关性,把各指标进行两两比较,相关系数越大,说明相关性越高^[15]。0.01 水平表示两组数据具备显著性差异的可能性为 99%。

4 基于三轴 UU 试验的软土强度分析

4.1 土体单元应力状态

三轴 UU 试验采用总应力法,应力状态比较明确。极限平衡条件下,土体破坏时土中一点出现一对剪切破裂面 α_{cr} (图 3),为该应力状态下的土样强度最弱剪切面,土样破坏特征与工程实际情况基本吻合^[7]。

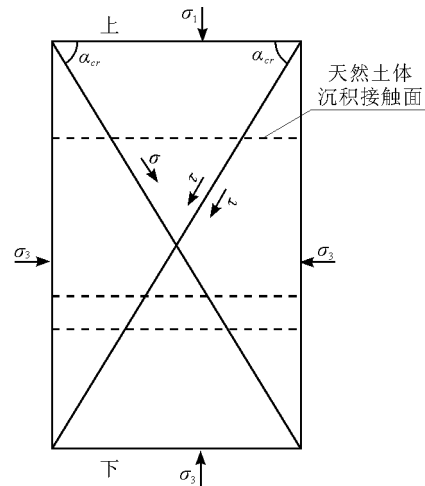
σ_1 为竖直面方向应力,取土体上覆自重应力, σ_3 (水平方向)可根据公式(1)计算,剪切破裂角 α_{cr} 为 $45^\circ + \varphi_{uu}/2$,根据公式(2) 可以计算出土体所处深度实际剪切强度 τ 。根据公式(2) 知,摩擦强度决定于剪切面上的法向应力 σ 和土的内摩擦角 φ_{uu} 。较

大的法向应力将产生较大的摩擦强度,与土体埋深正相关;黏聚强度 C_{uu} 只取决于土粒之间的物理化学作用力。

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45^\circ - \varphi_{uu}/2) - 2C_{uu} \tan(45^\circ - \varphi_{uu}/2) \quad (1)$$

$$\tau = C_{uu} + \sigma \tan \varphi_{uu} = 1/2(\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\alpha_{cr} \quad (2)$$

$$\alpha_{cr} = \pm (45^\circ + \varphi_{uu}/2) \quad (3)$$



注: σ 为剪切面上的法向总应力; τ 为破裂面上的抗剪强度; C_{uu} 为黏聚力; φ_{uu} 为摩擦角; α_{cr} 为破坏面与最小主应力的夹角。

图 3 极限平衡状态下的剪切破坏特征

4.2 软土剪切面特征分析

土体在压力作用下,遵循大孔隙优先改变原则,首先大孔隙被压成多个小孔隙,原来的小孔隙越来越小,但小孔隙大小改变不明显^[16]。土体颗粒之间的胶结强度是不同的,三轴试验 UU 试验一般沿土样 α_{cr} 角度形成破裂面(图 3),在土体颗粒之间最薄弱的胶结处破坏,一般先形成微破裂面,随着压力的不断增大,土体最大主应力发生偏转,最终最大主应

力垂直剪切面和颗粒长轴的优势方向,土体发生剪切破坏,形成一对椭圆形剪切斜面。

基于数据的统计分析,土体破坏剪切面角度最大值为 48.35° ,最小值仅为 45.45° ,平均值为 45.97° 。破坏角主要落在 $45.5^\circ \sim 46.3^\circ$ 这一区间内,破坏角占总数的 87% (图 4)。

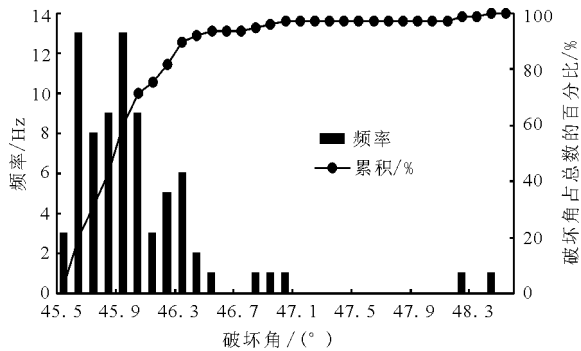


图4 破坏角统计直方图

4.3 软土强度特征

制样采用垂直方向切取试样方式,三轴 UU 试验得出的软土剪切指标见表 2。由表 2 可知, C_{uu} 平均值为 19.6 kPa; φ_{uu} 平均值为 1.95° 。计算结果显示软土剪切强度最大值为 80.5 kPa,最小值为 17.5 kPa,平均值为 37.6 kPa。

表2 三轴 UU 试验得出剪切指标

剪切指标	C_{uu}/kPa	$\varphi_{uu}/(^{\circ})$	τ/kPa	$\tau_{\varphi}/\text{kPa}$
最大值	46.0	6.70	80.5	58.5
最小值	7.0	0.90	17.5	5.2
平均值	19.6	1.95	37.6	18.0

注: τ_{φ} 为摩擦强度; C_{uu} 为黏聚力,即黏聚强度。

三轴 UU 试验测得土体强度 τ 与土样深度在 0.01 水平上显著正相关。土体强度 τ 和其他物理力学指标的相关程度规律,和 φ_{uu} 与其他物理力学指标的相关程度规律相似。基于 Mohr - Coulomb 定律,随着深度的增加,摩擦强度 τ_{φ} (即抗剪强度 τ 与土体黏聚力 C_{uu} 的差值)越来越大(图 5),黏聚力对抗剪强度的贡献量保持不变。

基于数据统计,第 2 层软土摩擦强度平均值为 18.0 kPa,第 1 层软土摩擦强度平均值为 3.4 kPa;第 2 层软土平均摩擦强度占土体平均剪切强度的 46.03%,第 1 层软土平均摩擦强度的占土体平均剪切强度的 14.53%。

4.4 软土抗剪指标影响因素分析

相关性分析结果显示:三轴 UU 试验测得 C_{uu} 与

物理指标相关性差。 C_{uu} 与压缩模量在 0.01 水平上显著正相关,相关系数为 0.378,即土体压缩性越低,土体剪切强度越高。

三轴 UU 试验测得 φ_{uu} 与黏粒含量、液限、塑性指数在 0.01 水平上显著负相关,这 3 个物理量基本上反映了一类指标,指标越大,土体摩擦角越小。 φ_{uu} 与砂粒含量在 0.01 水平上显著正相关,相关系数为 0.558,砂粒含量越高,摩擦角越大。 φ_{uu} 与压缩模量在 0.05 水平上显著正相关,压缩性越低, φ_{uu} 越大。

5 基于 UTC 试验的软土强度分析

无侧限抗压强度试验是三轴 UU 试验的一个特例,将土样置于不受侧向限制的条件下进行的压力试验,此时土样所受的围压为零,最大主应力的极限值即为无侧限抗压强度。制样采用垂直方向的切取试样方式,最大主应力为垂直方向,土样破坏特征与三轴 UU 试验类似。UTC 试验测得软土强度 $q_u/2$ 最大值为 71.5 kPa,最小值为 7.0 kPa,平均值为 30.0 kPa。

UTC 试验测得抗剪强度 $q_u/2$ 与土样深度在 0.01 水平上显著正相关,相关系数 0.360,说明软土强度与土体应力状态相关;抗剪强度 $q_u/2$ 与压缩模量在 0.01 水平上显著正相关,说明土体压缩性越小,土体抗剪强度越大。

6 强度差异原因分析

土体固有各向异性对强度指标的影响。袁聚云等^[11]、洪昌华等^[12]、Mitchell 等^[9]、高彦斌等^[10] 的研究表明软土强度具有各向异性,选择不同的剪切方向,会得出不同的剪切强度。高彦斌等^[10] 采用异形十字板试验得出上海滨海相软土水平剪切面强度最低,垂直方向切取试样抗剪能力最高。研究区第 2 层软土颗粒组成、含水率和压缩模量等指标与上海滨海相软土基本相当,研究区软土不排水强度特征也有类似规律。

采用直剪试验中的快剪试验,采用垂直方向切取,剪切面为水平面(沉积接触面),为土体最弱结构面。基于数据统计分析知:研究区软土的快剪指标黏聚力 C_q 平均值为 13.7 kPa,小于三轴 UU 试验得出的 C_{uu} 均值 19.6 kPa,线性回归分析预测曲线也有相似的规律(图 6),差值为 5.9 kPa。根据作者的研究,连云港海相软土也有这类似规律。

UTC 试验测得的第 2 层软土不排水抗剪强度 $q_u/2$ 小于基于三轴 UU 试验计算强度 τ ,平均值的差

值为 7.7 kPa,两种试验方法得到的软土抗剪强度随深度变化的回归预测曲线不重合(图 7)说明试验方法对软土强度指标获取影响较大,这与研究区第 2

层软土摩擦角较大有关。研究区软土粉粒含量高,局部夹粉砂薄层,所以一组三轴试验的摩尔应力圆半径不等,强度包线非水平直线,即摩擦角不为零。

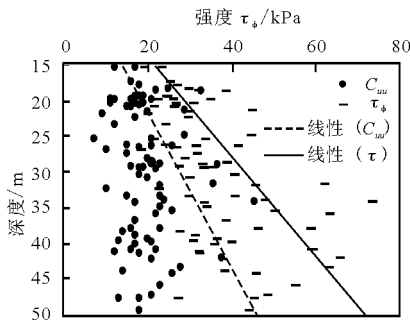


图 5 软土黏聚力和强度随其埋深分布图

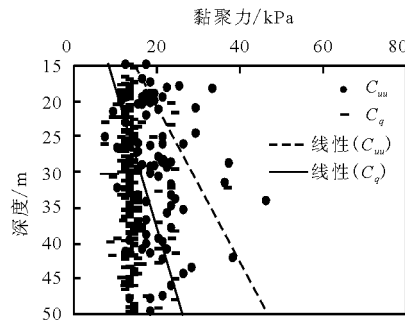


图 6 软土黏聚力随其埋深分布图

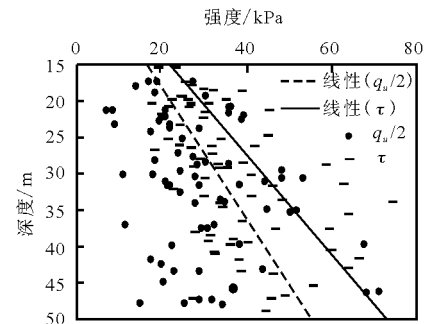


图 7 软土强度随其埋深分布图

土样在采取过程中,土体经历了一个应力释放并且重新分布过程,土体由原位的天然不等向应力状态转变为各向总应力相等;土样在应力重新调整过程中,土体孔隙水承受负压,土样中一部分气体逸出,土样体积稍有膨胀,因此有必要对土体应力进行恢复,才能准确得到软土原位剪切强度。可以采用 K_0 预固结对土体应力进行修正,垂直固结压力取土样上覆土体自重,侧向固结压力取 K_0 (静止土压力系数)倍的土样上覆土体自重。土样埋深越大,修正的效果越明显,修正后的原状土样抗剪强度增加了 1.11~2.15 倍。由三轴 UU 试验和 UTC 的试验过程知,前者为有围压状态 ($\sigma_2 = \sigma_3$) 的剪切试验,后者围压为零,不能对损失的应力进行恢复。根据公式(2)知,随着深度的增加,摩擦强度越来越大,土体应力状态对土体强度影响越来越大。此外,UTC 只能得到软土的总强度,不能得到土体的黏聚力和摩擦角。

7 软土强度较高的原因分析

根据粒度分析知:第 2 层软土以粉粒为主,其次为黏粒含量,含少量砂粒,粉粒平均含量 71.55%,黏粒平均含量 26.41%。根据 X 衍射物相分析,第 2 层软土矿物成分以原生矿物为主,约占总矿物的 67%,基本与粒度试验得出的粉粒含量一致。原生矿物主要为石英,约占矿物总量的 49%,其次为长石,含有少量方解石和白云石。第 2 层软土的黏土矿物伊利石均值为 14.33%,绿泥石均值为 11.33%,蒙脱石均值为 10.36%,偶见少量凹凸棒石。其中蒙脱石对土的工程特性影响最大^[7,17],一般黏土矿物形状为片状,比表面很大,黏土矿物颗粒表面结合水膜很厚,造成土体颗粒之间直接接触很

少^[18],土体颗粒间易发生滑动,决定了软土强度低于一般黏性土层,但研究区软土粉粒含量高,决定了研究区软土强度较典型海相软土不排水抗剪强度高,研究区第 2 层软土约为连云港地区典型海相软土不排水剪切强度的 2.87 倍

黏性土活动度 A 是反映黏土矿物活性的一个定量指标。工程地质手册规定: $A \leq 0.75$ 为非活性黏土; $0.75 < A \leq 1.25$ 正常黏土; $A > 1.25$ 活性黏土。研究区软土活动度 A 最大值为 1.97,最小为 0.57,平均值为 1.13,平均值小于 1.25,说明研究区软土黏土矿物活性一般,软土类型主要为正常黏性土,这是研究区软土强度高的一个原因。

研究区两层软土在形成时,沉积环境被高矿化度海水浸渍,水中离子 Na^+ 和土中的 Ca^{2+} 发生了离子交换,这时就形成了沉积土层中含有较高的易溶盐类。第 2 层软土含盐量范围值为 0.19%~1.19%,土体中盐类主要为氯化钠,软土含盐量普遍较高。土体提取液 pH 值范围值为 7.73~9.41,呈碱性。邓永峰等^[18]研究表明,软土在其盐分溶脱后,压缩性和次固结变形增大,渗透系数变小,表明土体含盐量对土体结构、压缩性、强度、渗透性等有影响。龚士良等^[19]的研究表明,因电解质 NaCl 高形成软土絮凝结构。研究区软土结构单元体呈团粒-絮凝状结构,片状黏土矿物颗粒贴在粉粒和砂粒颗粒周围,粉粒和砂粒起到了骨架作用,单元体之间接触点比较多,架空孔隙并不十分发育,未见大于 10 μm 的孔隙。张宏等^[3]通过对软土微观参数孔隙面积与固结压力关系曲线,证实了研究区软土具有明显的结构性,说明研究区软土具有很强的结构性抗力和附加抗力,这也是第 2 层软土强度高的一个原因。这样就从土体颗粒组成、矿物成分、含盐量、

微观结构、土体屈服应力的方面解释了第2层软土抗剪强度特征。

8 结 论

(1) 研究区两层软土为碱性环境下沉积的非均质海陆交互软土,以粉粒为主,其次为黏量,含少量砂粒。黏土矿物活性一般。软土含盐量普遍较高,结构单元体呈团粒-絮凝状结构,具有明显的结构性,软土强度较典型海相软土高,特别是 φ_{un} 较大。

(2) 土体制样采用垂直方向的切取方式,这种制样方式垂直土体沉积面,三轴UU试验土体沿该制样方式下的最弱剪切面破坏。采用三轴UU试验得出的 C_{un} 和 φ_{un} ,基于摩尔-库伦理论计算出土体实际深度剪切强度。

(3) UTC试验测得的不排水抗剪强度 $q_u/2$ 小于三轴UU试验测得强度 τ ,这与研究区第2层软土摩擦强度较大和破坏时的应力状态有关。

(4) 土体的剪切强度具有固有各向异性,当剪切面平行土体沉积面时,土体剪切强度最低。快剪试验前剪切面可以人为控制,为固定的水平面,平行于土体沉积层理,基于几百组数据统计分析知:研究区软土的直剪快剪指标 C_q 小于三轴UU试验得出的 C_{un} 。

参考文献:

[1] 刘志彬,刘松玉,经纬,等.长江口海陆交互沉积土复合地基孔压响应特性[J].岩土工程学报,2015,37(s2):91-95.

[2] 苟富刚,龚绪龙,梅芹芹.长江三角洲北岸土体工程地质层组划分及其应用[J].地质论评,2018,64(1):237-245.

[3] 张宏,柳艳华,石名磊.海陆交互黏性土工程特性及微结构特征[J].土木建筑与环境工程,2009,31(6):47-52.

[4] LEROUEIL S, ROCHELLE P L, TAVENAS F, et al. Remarks on the stability of temporary cuts [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(27): 687-692.

[5] 吴玉辉,侯晋芳,闫澍旺.软土地基稳定性计算中抗剪强

度指标的相关分析[J].水利学报,2011,42(1):76-80.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.

[7] 常士骝.工程地质手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.

[8] 中华人民共和国水利部. GB/T50123-1999 土工试验方法标准[S].北京:中国建筑工业出版社,1999.

[9] MITCHELL J. K, SOGA K. Fundamentals of soil fundamentals of soil behavior[M]. John Wiley & Sons, INC. 2005.

[10] 高彦斌,楼康明.上海软黏土强度固有各向异性[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(11):1658-1663.

[11] 袁聚云,杨熙章,赵锡宏,等.上海软土各向异性性状的试验研究[J].水电自动化与大坝监测,1996,20(2):10-14.

[12] 洪昌华,龚晓南.不排水强度的空间变异性及单桩承载力可靠性分析[J].土木工程学报,2000,33(3):66-70.

[13] 吴燕开,刘松玉,洪振舜.土层工程性质与其沉积环境关系分析研究[J].工程地质学报,2004,12(03):263-267.

[14] 王靖泰,郭蓄民,许世远,等.全新世长江三角洲的发育[J].地质学报,1981(1):67-81.

[15] 苟富刚,龚绪龙,李进,等.江苏滨海平原微承压水层位水土体含盐特征及其相关性分析[J].水资源与水工程学报,2017,28(3):72-76.

[16] 周翠英,牟春梅.软土破裂面的微观结构特征与强度的关系[J].岩土工程学报,2005,27(10):1136-1141.

[17] 周晖.矿物成分对软土强度性质的影响分析[J].工业建筑,2013,43(7):61-64.

[18] 邓永锋,岳喜兵,张彤炜,等.连云港海相软土在孔隙水盐分溶脱环境下的固结特性[J].岩土工程学报,2015,37(1):47-53.

[19] 龚士良.上海软黏土微观特性及在土体变形与地面沉降中的作用研究[J].工程地质学报,2002,10(4):378-384.