

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.05.012

# 福建沿海原状软土力学特性试验研究

田琦<sup>1</sup>, 陈国焱<sup>1</sup>, 王伟<sup>1</sup>, 史宗刚<sup>2</sup>, 刘红位<sup>2</sup>

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100160;

2. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 软土广泛分布于我国沿海地区, 其较差的工程性质往往给工程建设带来不均匀沉降、承载力低, 因此开展原状软土力学特性研究具有重大意义。以滨海原状软土为研究对象, 通过系统的室内试验研究土体细微观、物理力学及压缩固结特性。试验研究发现: (1) 浅层(4 m)和深层(24 m)土体细微观结构差异较大, 浅层土中孔隙较多且呈鳞片状而深层土小孔隙比较低多为小孔。(2) 土体压缩固结特性受到土体细微观和沉积环境影响, 变化规律迥异, 不同深度土体压缩性大小顺序具体为: 29 m > 4 m > 24 m。(3) 土体抗剪强度随深度先增大后减小, 主要受到土体粒径分布及有机质含量的影响, 有机质含量越高软土抗剪强度越低。

**关键词:** 滨海原状软土; 压缩固结; 直剪试验; 三轴试验; 微观结构; 剪切强度

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)05-0078-07

## Experimental Study on the Mechanical Properties of Natural Soft Soils Along Coast Area of Fujian Province

TIAN Qi<sup>1</sup>, CHEN Guoyao<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, SHI Zonggang<sup>2</sup>, LIU Hongwei<sup>2</sup>

(1. Power China Roadbridge Group Co., Ltd., Beijing 100160, China;

2. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

**Abstract:** Soft soil is widely distributed in coastal areas of China, and its poor engineering properties often bring uneven settlement and low bearing capacity to engineering construction, so it is of great significance to analyze the mechanical properties of undisturbed soft soil. A systematic indoor test was conducted to investigate the microstructure, physical mechanics and compressive consolidation characteristics of coastal natural soils. The results are as follow. (1) there is a great difference in microstructure between shallow soil (4 m) and deep (24 m) soil. The pores in shallow soil are scalier, while the pores in deep soil are relatively few and mostly small holes. (2) The compressive consolidation characteristics of the soil are influenced by the microstructure and the depositional environment according to different rules, the order of compressibility of soil at different depths is: 29 m > 4 m > 24 m. (3) Shear strength of the soil increases and then decreases with depth, which is mainly influenced by the particle size distribution and organic matter content of the soil, the higher the organic matter content, the lower the shear strength of the soft soil.

**Keywords:** natural soft soils; compression consolidation; direct shear test; triaxial test; microstructure; shear strength

我国经济发展迅速, 城市化规模与日俱增。软土广泛分布于我国东南沿海地区, 具有高含水率、高压缩性、孔隙比大、高灵敏度、低渗透性、承载力低、力学强度差等特性<sup>[1-4]</sup>。工程实例表明, 若软土处

置不当, 会导致工程质量不合格, 甚至是引起较大的工程事故<sup>[5-8]</sup>。因此, 应开展系统的试验, 研究软土的基本特性, 为工程建设提供理论参考。

众多学者开展了软土压缩固结特性的研究, 发

收稿日期: 2023-06-17

修稿日期: 2023-07-14

作者简介: 田琦(1991—), 男, 工程师, 主要从事岩土工程等方面工作。E-mail: lqtianqi@powerchina.cn

通讯作者: 陈国焱(1993—), 男, 工程师, 主要从事岩土工程等方面工作。E-mail: 627878378@qq.com

现土体结构是重要的影响因素。软土次固结系数变化以结构发生破坏时的结构屈服应力为分界,次固结系数在接近结构屈服应力时达到最大<sup>[9-10]</sup>。由于土体受结构性影响,近海软土和深海软土<sup>[11-12]</sup>对荷载敏感度不同,固结系数存在差异。吴雪婷<sup>[13]</sup>通过试验发现固结系数与固结应力之间存在显著的双对数线性相关性,得出淤泥固结系数随固结应力的变化规律可以用先期固结压力与荷载的相对大小关系来解释,并利用“改进的门田法”得到验证。以上是学者对不同地区软土压缩特性的研究,但福建沿海地区滨海结构性软土的压缩固结特性研究相对缺乏,而软土压缩固结特性是工程建设的重要参数,因此研究福建沿海地区滨海结构性软土的压缩固结特性具有重大的理论意义。

软土强度特性亦是研究者关注的焦点。部分学者采用原位试验确定土体抗剪强度及其结构特征规律<sup>[14-16]</sup>。室内试验三轴剪切试验表明,初始应力状态对饱和黏性土抗剪强度指标的影响显著,试验中应恢复土体原始应力状态<sup>[17]</sup>,试验方案影响土体的抗剪强度参数<sup>[18]</sup>。Hong等<sup>[19]</sup>基于原状和重塑软粘土试样强度特性的比较,提出了当土体受压达到屈服后应力状态时,结构抗力完全消失的土结构损失新解释。李旭昶等<sup>[20]</sup>发现扬州软土的内摩擦角与塑性指数、黏聚力和液限指数具有一定相关性。近年来,研究者发现细微观是分析土体强度重要因素,徐日庆等<sup>[21]</sup>以平均接触面积率为评价土体抗剪强度指标,证明微观参数定量表征宏观力学特性的可行性。张先伟等<sup>[22]</sup>也发现湛江黏土塑性指数和抗剪强度与孔隙比相关性较差,区别于其他地区黏土。综上,软土区域性很强,特别是海相软土可借鉴的资料相对较少,因此,开展对滨海软土的研究,探明其强度特性不仅可增加对软土的理解亦可为工程实践提供基本参数。

本文针对霞浦地区滨海原状软土开展一系列室

内试验,包含直剪试验(固结快剪、固结慢剪)、一维压缩固结试验和常规三轴固结排水剪切试验。旨在探明:1)滨海软土的压缩性;2)软土的力学特性(抗剪强度);3)土体细微观结构和有机质等对土体力学特性的影响。

## 1 试验用土和试验方法

### 1.1 试验土样

本次试验所用土样取自福建霞浦县滨海新城项目湖滨北路 K1 + 640 右幅路基外缘未处理区域,取样方式为钻机连接尺寸 80 mm × 500 mm 的铁制薄壁取土器取样。共对 2 个钻孔取样,至淤泥土层,取样质量等级为 I 级标准,扰动程度为不扰动,满足室内开展各类试验的要求<sup>[23]</sup>。取样完成后立即编录封装保存,运回实验室,运输过程中应尽可能减少振动,以免对原状土样产生扰动破坏,土样保存过程中,应保持取土管呈直立状态,否则将会使土样发生除原始重力方向以外的其他方向固结。采用推土器以 288 mm/min 的速率小心推出取土管中土样,根据不同试验要求制备规定尺寸试样,切除余土,测定土体相关物理特性参数。不同深度粒径分布曲线如图 1 所示,土样的基本特性如表 1 所示。

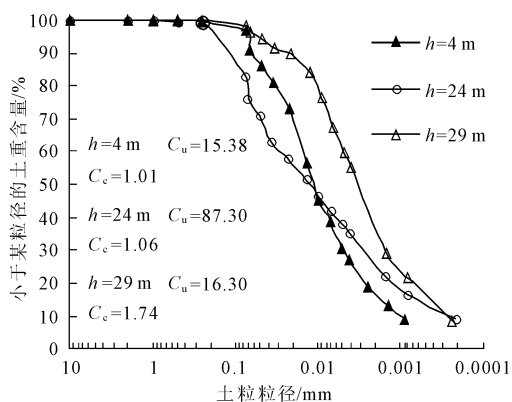


图1 土体粒径分布曲线

表1 土体基本特性

深度 $h/m$	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_P/\%$	液性指数 $I_L$	塑性指数 $I_P$	颗粒含量/%			土体分类 (GB 50145—2007)	有机质 含量/%
					砂粒含量/ 2 mm ~ 0.075 mm	粉粒含量/ 0.075 mm ~ 0.005 mm	黏粒含量/ $\leq 0.005$ mm		
4	34.50	19.80	1.55	14.7	3.12	66.47	30.41	低液限黏土 (CL)	4.54
24	32.90	16.30	1.05	16.6	17.34	44.90	37.76	低液限黏土 (CL)	3.58
29	41.20	20.00	1.47	21.2	1.87	38.46	59.67	低液限黏土 (CL)	4.85

注:土体分类根据土的分类标准<sup>[24]</sup>进行定名。

### 1.2 试验方法

本文试验包含固结试验、直剪切试验、三轴固结

排水剪切试验及扫描电镜试验。

#### (1) 标准固结试验

采用三联高压固结仪进行一维压缩固结试验。分别选取 4 m、24 m、29 m 深度土体制备环刀原状土试样,每个深度取 3 个重复组试样进行试验。按照土工试验方法标准<sup>[25]</sup>要求逐级加卸载,每一级荷载稳定时间为 24 h,需保证每级加载后,百分表读数 $\leq 0.005$  mm/h,方可进行下一级加载。

### (2) 直剪试验

固结快剪和固结慢剪试验剪切速率分别为 0.8 mm/min、0.02 mm/min,在剪切过程中量力环读数达到最大值,则以该最大值为试样剪切力破坏值,若剪切全过程无峰值出现,则取剪切位移为 4 mm 时所对应的剪切力为剪切破坏值。在剪切过程中应在剪切盒槽内加水,加压盖上以湿棉花包裹,防止因高温导致试样水分蒸发。

### (3) 三轴固结排水剪切试验

使用 TKA-TTS 型应力-应变控制式三轴剪切试验仪对深度为 24 m 土体开展三轴固结排水(CD)剪切试验。围压 $\sigma_3$ 值分别为 50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa,试样的尺寸为 39.1 mm $\times$ 80 mm。将制备完成后三轴试样用饱和器固定好后放置于真空饱和装置内用抽真空法进行饱和,饱和完成后即可对试样进行安装并开展试验。首先,设定一定的围压( $\sigma_3 = 50$  kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa)和反压( $\sigma_1$ ),检查试样饱和度,当 $B = \Delta u / \Delta \sigma_3 > 0.95$ 时,即视为完成饱和。然后,在一定围压条件下对试样进行各向等压固结。最后,开展剪切试验,剪切速率为 0.012%/min<sup>[25]</sup>,当轴向应变 $\varepsilon_1$ 达到 16%时终止试验。

### (4) 扫描电子显微镜(SEM)

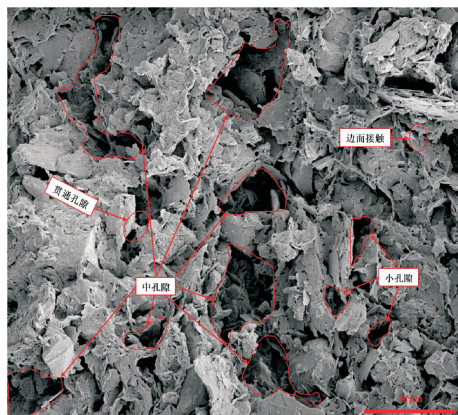
利用 S-4800 场发射扫描电子显微镜(S-4800 II FESEM)观察深度 4 m 和 24 m 土体微观结构。按照水平方向选取米粒大小土样,采用真空冷冻干燥机在 $-50^\circ\text{C}$ 条件下抽真空(24 h 以上)冰干试样<sup>[26]</sup>。将干燥后试样使用导电胶带固定于实验台上,采用英国 EMITECH K550X 型全自动磁控离子溅射仪(参数设定为 20 mA,60 s)喷金处理固定于实验台上试样,以增强导电性,如试样表面喷金不均匀时,可做重复喷金处理。将处理完成后试样放大 3 000 倍,观察土体结构基本情况及变化规律。

## 2 试验结果与讨论

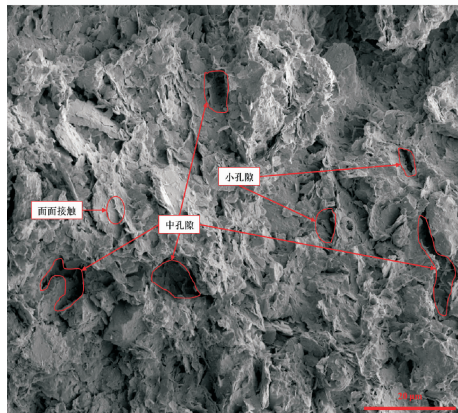
### 2.1 土体细微观结构

图 2 分别是浅层(4 m)和深层(24 m)土体扫描电镜图(SEM)。由图可知,浅层(4 m)土体颗粒间多为边-面接触、面-面接触,层状结构整体性较差,

层间无较强紧密性,呈鳞片状构造。颗粒间含有较多中型孔隙( $1\ \mu\text{m} < D \leq 10\ \mu\text{m}$ ),同时土层表面存在大量小型( $0.1\ \mu\text{m} < D \leq 1\ \mu\text{m}$ )、微型孔隙( $D \leq 0.1\ \mu\text{m}$ )<sup>[27]</sup>。深层(24 m)土体颗粒间多为面-面接触,具有一定层状结构,层间接触紧密,孔隙较小。其中一个原因是可能是上覆土压力增加,导致土体密实度提高,土体孔隙减小<sup>[28]</sup>。深度 4 m 和 24 m 的土体不均匀系数( $C_u$ )分别为 15.38 和 87.3,曲率系数( $C_c$ )分别为 1.01 和 1.06。由此可知,深度为 24 m 的土体颗粒粒径分布曲线平缓,不均匀系数较大,土颗粒分布不均,颗粒级配较佳,大孔隙被细颗粒填充,推测孔隙总量降低。



(a) 浅层土体(4 m)



(b) 深层土体(24 m)

图 2 扫描电镜图

### 2.2 一维压缩固结

不同深度原状土一维压缩固结试验的 $e-p$ 曲线和 $e-\log p$ 曲线,如图 3 所示。总体上,软土在压缩过程中存在明显的拐点,这是由于土体的结构性<sup>[10]</sup>产生结构屈服应力,压缩固结初期土体所受压力小于结构屈服应力,导致加载初期曲线较为平缓,土体变形量较小。当压力逐渐增大达到屈服应力时,压缩曲线出现拐点,压缩变形量加剧,其原因可

能是土体结构改变,土体结构对压缩特性的影响逐渐变小至消失。土体大孔隙破坏,土中水排出量增大、孔隙比减小趋势加剧,颗粒间产生滑移。试验结果与 Jiang 等<sup>[10]</sup>的研究成果类似。加载至一定荷载后,孔隙比变化幅度降低,逐渐呈平缓趋势发展,说明土体结构性完全散失,土体结构抗力消散。

水无法迅速排出,孔压消散较慢,固结度降低。试验研究表明,沉积环境及粒径分布造成土层压缩固结特性沿深度变化规律不一致。

表 2 土体压缩性指标

深度 <i>h</i> /m	孔隙比 <i>e</i>	压缩系数 $a_v$ /MPa <sup>-1</sup>	压缩模量 $E_s$ /MPa	固结系数 $C_u$ /(cm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	压缩指数 $C_c$
4	1.20	0.90	2.23	0.17	0.30
24	0.93	0.72	2.46	0.08	0.24
29	1.24	1.02	1.96	0.09	0.34

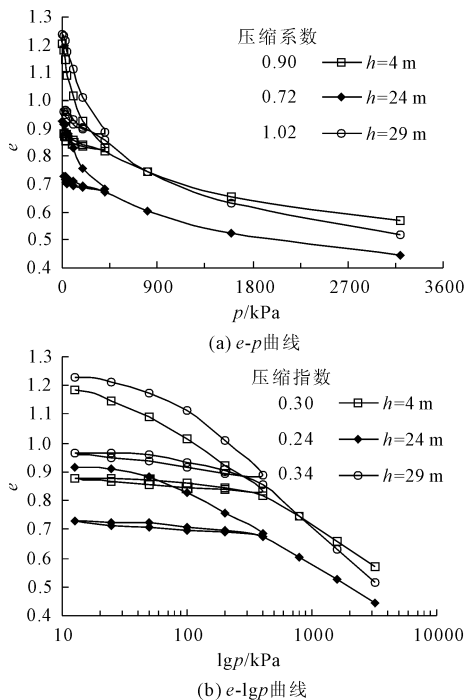


图 3 土体压缩曲线

由图 3 可知,随着土层深度增加,土体初始孔隙比先减小后增大,即  $e_{29m} > e_{4m} > e_{24m}$ 。对比深度为 4 m 与深度为 24 m 土层,孔隙比大小与 SEM 结果吻合。浅层(4 m)土颗粒间以边-面接触为主,孔隙数量较多,存在孔隙贯通现象。而深层(24 m)土颗粒间以面-面接触为主,层间接触紧密,孔隙数量较少。土体受压缩变形的实质是土粒间孔隙逐渐减小的过程,土颗粒间接触方式不同,导致孔隙分布规律和数量存在差异,从而影响其压缩性。研究结果表明<sup>[19]</sup>,不同深度土体初始孔隙比沿深度方向向下延伸呈现逐渐减小、压缩性减小的趋势。

土体压缩指标如表 2 所示。由表 2 可知,随着深度增加,土体压缩系数、压缩指数先减小后增大,压缩模量先增大后减小。本研究结果与前人研究成果存在一定差异,主要原因受到海相结构沉积历史影响,沉积物中砂质物与黏土质物组成水平互层理,黏性土或薄层黏土与粉、细砂互层,类似于“千层饼”特征使得土体压缩性沿深度变化呈现交叉变化的“千层饼”结构特性<sup>[29]</sup>。此外,深度为 24 m 土层土粒级配均匀,孔隙占比少,土体饱和渗透系数较小,孔隙

图 4 是深度 4 m、24 m 和 29 m 土层压缩固结的  $e-t$  关系曲线。由图 4 可知,在施加某级荷载初期,孔隙比急剧降低,试样变形量较大;随着时间推移,孔隙比变化速率减缓,变形量较小。土体固结主要分为:主固结、次固结两个阶段,在施加荷载初期孔隙水压力消散,土体孔隙受压缩,为主固结变形阶段;当土体变形速率趋于平缓的后期,孔隙水压力消散,土体骨架发生缓慢变形,为次固结变形阶段。当压力达到结构屈服应力时,土体结构破坏,主次固结界限明显<sup>[10]</sup>。

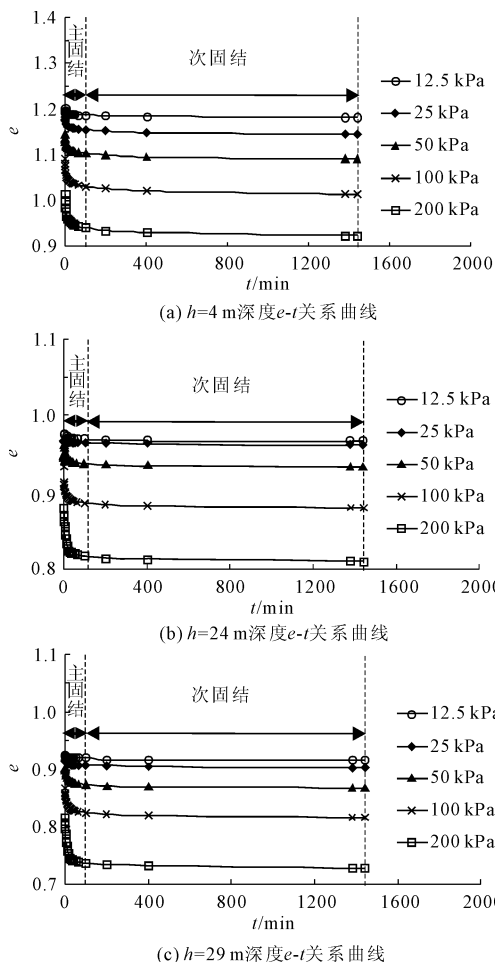


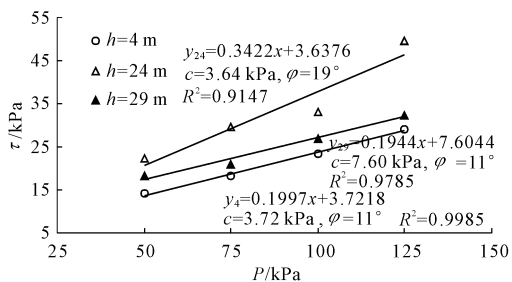
图 4 不同深度土体  $e-t$  关系曲线

试验结果表明,在相同条件下不同深度土体孔隙比随时间变化规律具有一致性。土体结构性对于土层压缩固结变形有重要影响,土颗粒间接触方式发生变化,孔隙分布规律和数量不同,导致土体压缩性不同。

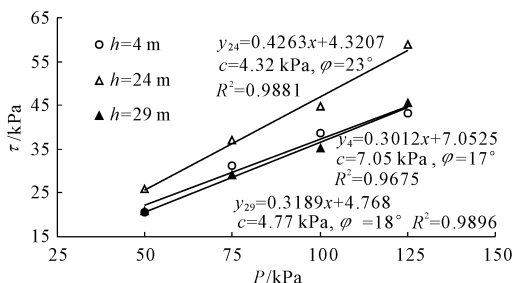
### 2.3 剪切强度

#### (1) 直剪试验

抗剪强度曲线如图 5 所示。随着深度增加,固结快剪试验得到的黏聚力先减小后增大,而摩擦角则先增大后减小。固结慢剪试验与快剪试验结果具体数值不同,但是趋势一致。土体抗剪强度随深度先增大后减小,24 m 处试样抗剪强度最大,4 m 和 29 m 深度土体次之,且两者间差距不大。主要原因是不同深度土层结构及粒径分布不同,土体强度随级配良好程度呈正相关关系<sup>[30]</sup>,深度 24 m 土体不均匀系数最大,其值约为 87.3,该深度土体级配最好,抗剪强度值最大。相同固结条件下,同一深度土体固结慢剪强度大于固结快剪抗剪强度,主要原因是慢剪过程中土体排水,土中含水率降低,包裹在土颗粒表面的结合水膜厚度变小<sup>[31]</sup>,导致土体抗剪强度提高。



(a) 固结快剪抗剪强度



(b) 固结慢剪抗剪强度

图 5 土体抗剪强度

因此,相同层位土体固结慢剪强度大于固结快剪强度。另一方面,土中有机质含量随着深度先减小后增大(见表 1),其变化规律与抗剪强度变化趋势相反,总体表现为有机质含量增加,土体抗剪强度降低。

#### (2) 三轴固结排水剪切试验

不同围压条件下偏应力( $\sigma_1 - \sigma_3$ )与轴向应变 $\varepsilon_1$ 关系曲线图 6 所示。偏应力随着轴向应变增大而逐渐增大,且增加速率逐渐变慢,无明显峰值,应力应变曲线为应变硬化,表明研究区软土为正常固结土。因软土偏应力-应变曲线无峰值出现,依据土工试验方法标准<sup>[25]</sup>,选取轴向应变为 15% 的偏应力值为峰值应力。

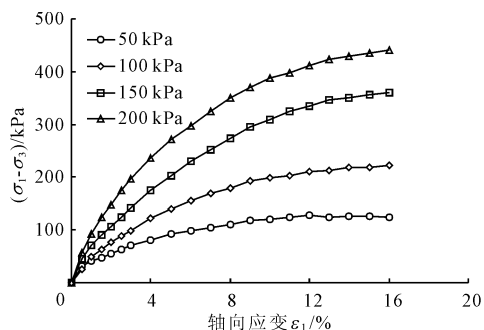


图 6 固结排水试验应力应变曲线(24 m)

固结排水试验有效强度包线如图 7 所示,对比直剪与三轴试验结果发现 24 m 深度土体的强度指标变化规律为: $\varphi_{\text{三轴}} (30.69^\circ) > \varphi_{\text{固结慢剪}} (23^\circ) > \varphi_{\text{固结快剪}} (19^\circ)$ ,  $C_{\text{三轴}} (5.45\text{ kPa}) > C_{\text{固结慢剪}} (4.32\text{ kPa}) > C_{\text{固结快剪}} (3.64\text{ kPa})$ ,导致这种现象的原因是三轴固结排水剪切试验排水过程稳定,排出水量最多,固结慢剪次之,固结快剪最少,黏聚力和内摩擦角随含水率增大而减小<sup>[32]</sup>,故而抗剪强度指标间大小关系呈现以上结果。图 8 为固结排水试验有效应力路径曲线, $q'$ 值随着围压的增大而增大,不同围压下应力路径变化规律基本一致,呈基本平行状态。剪切应变速率较为缓慢,有效应力路径在剪切过程中并不产生弯曲段,表现出试样在剪切过程中持续加载。

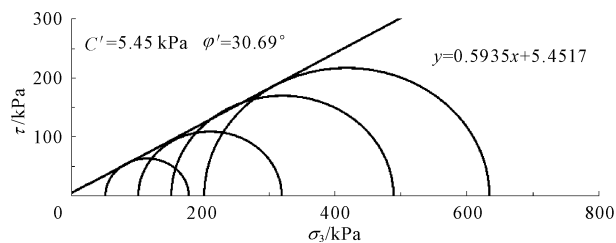


图 7 固结排水试验有效强度包线(24 m)

## 3 结论

本文通过系统的室内试验研究了霞浦地区滨海原状软土得到以下主要结论:

(1) 浅层( $h=4\text{ m}$ )土层同一水平面土颗粒间

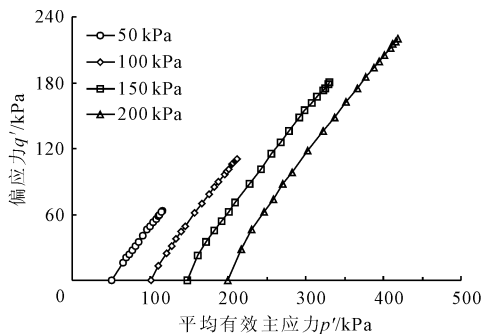


图8 固结排水试验有效应力路径( $h = 24\text{ m}$ )

连接方式多为边-面接触、面-面接触,层状结构整体性较差,颗粒间含有较多中型孔隙,存在少量小、微型孔隙;深层( $h = 24\text{ m}$ )土体颗粒间多为面-面接触,具有一定层状结构,面与面之间接触较为紧密,层间接触紧密,孔隙数量较少且多为小孔隙。

(2) 由压缩固结试验结果可知,不同深度土体压缩性大小顺序为:29 m > 4 m > 24 m。土体结构性、沉积环境及粒径分布存在差异,造成土颗粒间接触方式不同,使得孔隙分布规律和数量存在差异,从而导致压缩性不同。

(3) 固结快剪和固结慢剪抗剪强度随深度变化规律一致;固结慢剪抗剪强度大于固结快剪抗剪强度;土体级配越好,抗剪强度值越大;有机质含量对土体抗剪强度具有一定影响,有机质含量越高土体抗剪强度越低。

(4) 三轴固结排水试验中随着轴向应变增大,偏应力逐渐增大,应力应变曲线呈现应变硬化特征。

#### 参考文献:

[1] 宋许根,王志勇,柏威伟,等. 珠海软土工程特性空间异性规律研究[J]. 岩土工程学报,2019,41(S1):25-28.

[2] 前言[J]. 岩土工程学报,2021,43(S2):.

[3] 巫锡勇,张金行,廖昕,等. 西南地区淤泥质软土工程特性分析[C]//2015年全国工程地质学术年会论文集,2015:169-175.

[4] Xia Jia, Huang Guanglong, Yan Sanbao. Behaviour and engineering implications of recent floodplain soft soil along lower reaches of the Yangtze River in Western Nanjing, China[J]. Engineering Geology, 2006,87(1-2):48-59.

[5] 张玉成,杨光华,钟志辉,等. 软土基坑设计若干关键问题探讨及基坑设计实例应用分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(11):2334-2343.

[6] Tang Yiqun, Ren Xingwei, Chen Bin, et al. Study on land subsidence under different plot ratios through centrifuge model test in soft-soil territory[J]. Environmental

Earth Sciences, 2012,66(7):1809-1816.

[7] 杨宇,王奎,刘佑祥,等. 某深厚软土基坑事故分析及抢险加固设计案例[J]. 岩土工程学报,2014,36(S1):175-179.

[8] 冯诚,冯申辉. 深厚软土地区浅基坑事故的预防与处理实例[J]. 岩土工程学报,2012,34(S1):711-714.

[9] 张先伟,王常明. 软土结构性对次固结系数的影响[J]. 岩土力学,2012,33(2):476-482.

[10] Jiang Nan, Wang Changming, Wu Qian, et al. Influence of structure and liquid limit on the secondary compressibility of soft soils[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020,8(9):627.

[11] 陈晓平,朱鸿鹄,张芳枝,等. 软土变形时效特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(12):2142-2148.

[12] 蒋明镜,李志远,黄贺鹏,等. 南海软土微观结构与力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(S2):17-20.

[13] 吴雪婷. 温州浅滩淤泥固结系数与固结应力关系研究[J]. 岩土力学,2013,34(6):1675-1680.

[14] Schlue B F, Moerz T, Kreiter S. Influence of shear rate on undrained vane shear strength of organic harbor mud[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010,136(10):1437-1447.

[15] 年廷凯,范宁,焦厚滨,等. 南海北部陆坡软黏土全流动强度试验研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(4):602-611.

[16] Ren Yubin, Yang Qing, Wang Yin, et al. Experimental study on the undrained shear strength of deep-sea soft soil using improved T-bar penetrometer[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2020,38(10):1199-1208.

[17] 滕延京,盛志强,王曙光. 饱和黏性土抗剪强度的试验方法[J]. 岩土工程学报,2015,37(3):426-431.

[18] Chowdhury A, Sahu R B. Strain- and stress-controlled shear strength behaviour of Kolkata clays[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2022,16(1):3-15.

[19] Hong Zhenshun, Shen Shuilong, Deng Yongfeng, et al. Loss of soil structure for natural sedimentary clays[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering, 2007,160(3):153-159.

[20] 李旭昶,孙德安,徐永福. 扬州土物理与力学性质指标的相关性分析[J]. 工程地质学报,2019,27(2):333-340.

[21] 徐日庆,蒋琪珺,董梅,等. 排水剪切状态下饱和软土微观接触面积演化规律试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(2):411-419.

- [22] 张先伟,孔令伟,郭爱国,等. 湛江强结构性黏土的物理力学性质指标及相关性分析[J]. 工程地质学报, 2011,19(4):447-454.
- [23] 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [24] 土的工程分类标准:GB/T 50145—2007[S]. 北京:中国计划出版社,2007.
- [25] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [26] 张先伟,王常明. 一维压缩蠕变前后软土的微观结构变化[J]. 岩土工程学报,2010,32(11):1688-1694.
- [27] 王 港,张先伟,刘新宇,等. 厦门花岗岩残积土的压缩变形特性及其微观机制[J]. 岩土力学,2021,42(12):3291-3314.
- [28] 崔靖俞,张吾渝,解邦龙,等. 西宁地区不同深度原状黄土湿陷性及微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019,41(S2):249-252.
- [29] 柳艳华,石名磊. 海陆交互相下黏性土性状辨析及评价研究[J]. 岩土力学,2008,29(2):523-528.
- [30] 赵树德,廖红建. 土力学[M]. 第2版. 北京:高等教育出版社,2010.
- [31] 黄 琨,万军伟,陈 刚,等. 非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(9):2600-2604.
- [32] 申春妮,方祥位,王和文,等. 吸力、含水率和干密度对重塑非饱和土抗剪强度影响研究[J]. 岩土力学, 2009,30(5):1347-1351.

(上接第 26 页)

- [2] 王 岚,韩广森. 某住宅小区二期地下室基坑支护设计[J]. 建筑结构,2016,46(S2):545-549.
- [3] 赵 帅,余建民,王荣彦. 深基坑开挖对邻近住宅楼的变形影响分析[J]. 河南科技,2023,42(10):63-66.
- [4] 郭红仙,周 鼎. 软土中基坑土钉支护稳定性问题探讨[J]. 岩土力学,2018,39(S2):398-404.
- [5] 袁 野. 软土地区土钉支护应用实例[J]. 建筑技术开发,2018,45(23):85-86.
- [6] 杨继红,丁 鹏,杨兴隆. 深基坑开挖过程中土钉支护结构的变形与受力特性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(6):133-136.
- [7] 李鹏举,钱林根,吴 强,等. 悬挂式止水帷幕基坑降水开挖对临近高铁桥墩影响[J]. 山东科学,2022,35(6):116-122.
- [8] 喻 伟,陈鑫磊,张学民. 深圳富水软弱地层深基坑施工对周边环境的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020,17(9):2251-2261.
- [9] 张卫兵,张刚柱,韩自刚,等. 基于 HS-Small 本构模型的银川地区深基坑开挖-降水过程数值分析[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(2):211-218.
- [10] 张钦喜,宋亚通,闫金波. 悬挂式止水帷幕涌水量计算数值模拟及验证[J]. 岩土工程技术,2021,35(4):255-259.
- [11] 史伟中,陈颖辉,欧明喜,等. 基于 Midas GTS 岩土有限元软件模拟基坑降水对周围建筑物沉降的变形[J]. 中国水运,2020,20(1):255-258.
- [12] 张 军,冯佳蕊,翟少磊. 洞庭湖大桥锚定基坑降水及对地连墙影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018,14(S1):256-262.
- [13] 周小娟. 基坑开挖及降水的应力渗流耦合作用对邻近地下管线的影响[J]. 长江大学学报(自科版), 2017,14(9):59-64,6.
- [14] 刘 婧,陈锦剑,王建华. 虹桥交通枢纽多级梯次降水固耦合分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(S1):210-215.
- [15] 梁发云,贾亚杰,邓 航,等. 深基坑降水沉降计算土体弹性参数取值方法探讨[J]. 岩土工程学报,2017, 39(S2):29-32.
- [16] 韩文君,赵宇豪,闫 鑫,等. 常州地区基坑降水引起的地面沉降计算方法[J]. 城市轨道交通研究,2023, 26(1):55-59,64.
- [17] 李文广,胡长明. 深基坑降水引起的地面沉降预测[J]. 地下空间与工程学报,2008(1):181-184.
- [18] 吴意谦,朱彦鹏. 考虑疏干带非饱和土影响下基坑降水引起地面沉降的计算[J]. 工程力学,2016,33(3):179-187.
- [19] 任 壮,丁春林,吴 烁,等. 富水软弱地层基坑开挖中的土体变形与渗流特性[J]. 城市轨道交通研究, 2022,25(8):107-111.
- [20] 冯怀平,张伏光,岳祖润. 考虑流固耦合作用的深基坑有限元分析[J]. 地下空间与工程学报,2012,8(2):286-291,333.
- [21] 胡 涛,冯晓腊,熊文林,等. 武汉地区基坑降水引起的地面沉降机理及定量预测[J]. 土工基础,2002(2):48-50,67.