

# 珠海洪湾地区淤泥物理与宏观力学特性研究\*

李栋<sup>1</sup>, 汪旭<sup>1</sup>, 闫一辉<sup>2</sup>, 刘建坤<sup>2</sup>, 唐昌意<sup>1</sup>, 李智文<sup>1</sup>, 李智健<sup>2</sup>, 常丹<sup>2</sup>

1. 珠海市规划设计研究院, 广东 珠海 519001

2. 中山大学土木工程学院, 广东 珠海 519082

**摘要:** 珠海洪湾地区淤泥分布广泛, 且具有强度低、变形大、透水性差等特点, 其物理力学性质对于工程的安全性至关重要。为探明其工程特性, 本研究以现场所取原状淤泥试样为研究对象, 通过开展室内基本物性试验、一维固结试验和固结不排水三轴试验, 得到了原状试样的工程特性。试验结果表明: 现场原状土样天然含水量高, 塑性指数较大, 渗透系数 $k$ 为 $3.68 \times 10^{-7} \sim 5.86 \times 10^{-7}$  cm/s; 压缩系数 $a_v=1.269 \sim 1.618$  MPa<sup>-1</sup>、压缩模量 $E_s=1.449 \sim 1.919$  MPa, 判定其为高压缩性土; 随着土样深度的增加, 其压缩系数逐渐减小, 压缩模量逐渐增大; 该原状土样的抗剪强度较小, 黏聚力 $c=10.10 \sim 20.84$  kPa, 内摩擦角 $\varphi=7.28^\circ \sim 12.09^\circ$ ; 随着土样深度的增加, 其内摩擦角有较小的增长趋势, 而黏聚力整体表现为逐渐降低的趋势。

**关键词:** 珠海淤泥; 基本物理特性; 一维压缩特性; 三轴力学特性

中图分类号: TU411 文献标志码: A 文章编号: 2097-0137(2024)03-0032-06

## The physical and macroscopic mechanical properties of silt in the Hongwan area of Zhuhai

LI Dong<sup>1</sup>, WANG Xu<sup>1</sup>, YAN Yihui<sup>2</sup>, LIU Jiankun<sup>2</sup>, TANG Changyi<sup>1</sup>, LI Zhiwen<sup>1</sup>, LI Zhijian<sup>2</sup>, CHANG Dan<sup>2</sup>

1. Zhuhai Institute of Urban Planning & Design, Zhuhai 519001, China

2. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

**Abstract:** The Hongwan area in Zhuhai has widespread silt distribution, with specific engineering characteristics of low strength, significant deformation, and poor permeability. Its physical and mechanical properties are crucial for engineering safety. To explore the engineering characteristics of the silt, this study used undisturbed samples taken from the field to conduct laboratory experiments of basic physical property test, one-dimensional consolidation test, and consolidated undrained triaxial test. The results show that the natural moisture content of the soil samples is high, with a significant plasticity index and a hydraulic conductivity  $k$  ranging from  $3.68 \times 10^{-7}$  to  $5.86 \times 10^{-7}$  cm/s. It is classified as highly compressible soil based on the determined compression coefficient  $a_v$  ranging from 1.269 to 1.618 MPa<sup>-1</sup> and a compression modulus  $E_s$  ranging from 1.449 to 1.919 MPa. With increasing depth, samples show a gradual decrease in the compression coefficient and an increase in the compression modulus. The shear strength of the undisturbed soil samples is relatively low, with a cohesion  $c$  range of 10.10 to 20.84 kPa and an internal friction angle  $\varphi$  ranging from  $7.28^\circ$  to  $12.09^\circ$ . With increasing sample depth, the change in the internal friction angle is relatively small, while the cohesion significantly decreases.

**Key words:** silt in Zhuhai; basic physical properties; one-dimensional compression characteristics; triaxial mechanical properties

\* 收稿日期: 2023-01-10

录用日期: 2023-10-22

网络首发日期: 2024-01-17

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金(2020B1515120083; 2022A1515010087); 珠海市产学研合作项目(ZH22017001200149PWC); 珠海市社会发展领域科技计划项目(ZH22036204200009PWC)

作者简介: 李栋(1986年生), 男; 研究方向: 隧道与地下工程; E-mail: lidongcqu@163.com

通信作者: 刘建坤(1965年生), 男; 研究方向: 路基工程与岩土工程; E-mail: liujiank@mail.sysu.edu.cn

珠海地处珠江三角洲, 软土地基有着广泛的分布, 其陆地表层软土占陆地总面积的50%~60%, 且软土土层较厚, 较多的基础设施工程在软土地基上开展, 其工程力学特性与隧道、路基、排水等基础设施工程的建设关系密切。受排水情况、应力条件、结构特性等因素的影响, 软土的工程性质复杂并具有典型的区域性, 且天然含水量高、压缩性高、沉降量大、抗剪强度低, 软土的工程性质普遍较差。虽然国内外有着相对完善的研究方法, 但是各地软土特性有着较大差异。珠海洪湾地区的淤泥特性并没有被系统的研究, 因此探清该地区淤泥的工程特性是工程建设中的首要任务。

有许多学者对国内沿海城市的软土工程特性进行了一系列的分析研究, 对于沿海城市的软土特性有了诸多研究成果(袁聚云等, 1996; 王新波等, 1999; 陈晓平等, 2003; 张勇等, 2006; 周秋娟等, 2006; 刘汉龙等, 2008; 刘用海, 2008; 林奕禧等, 2009; 张静娴等, 2010; 杜雅峰等, 2013; 邵艳等, 2013; 王婧, 2013; Luo et al., 2014; 刘娉慧等, 2015; 夏云龙, 2015; 彭立才等, 2016; 谢敏等, 2018; 邱国阳等, 2019; 唐昌意等, 2021; 肖旺等, 2022), 对软土的变形特性(周秋娟等, 2006; 刘汉龙等, 2008; 张静娴等, 2010; 杜雅峰等, 2013; Luo et al., 2014; 刘娉慧等, 2015; 邱国阳等, 2019)和力学特性(丁晓庆, 2009; 邵艳等, 2013; 夏云龙, 2015; 彭立才等, 2016; 谢敏等, 2018; 肖旺等, 2022)有了一定的了解。比如, 丁晓庆(2009)通过室内宏观试验对广州地区软土进行了试验研究, 研究总结了广州地区软土的强度以及变形特性, 得到了广州地区工程建设的参考指标; 袁聚云等(1996)对上海原状软土按特定倾角取样, 除了进行三轴固结排水试验外还对软土的立方体试样进行真三轴试验, 最后得到了上海地区软土的强度和变形特性; 王新波等(1999)通过对上海地区的软土开展固结不排水、K0固结不排水三轴试验, 对得到的试验结果进行分析得到了上海地区软土的归一化性状; 夏云龙(2015)对杭州软土进行了系统的研究, 得到了杭州地区软土的压缩特性和剪切特性等, 并分析了各指标随深度变化的规律等; 邵艳等(2013)统计了合肥软土的物理力学指标, 得到了各指标之间的相关关系。而对于珠海地区软土, 彭立才等(2016)统计了横琴新区内大量软土试验结果, 并对试验结果进行了统计分析, 最终得到了软土的强度与变形特性随含水率的变化关系。唐昌意等(2021)总结了珠海平沙新城的勘察数据, 总结了

软土的特性和工程建设中的突出问题, 为滨海地区软土处理提供参考。林奕禧等(2009)通过收集珠海软土地区的工程建设经验和软土试验研究数据, 对珠海软土的物理力学指标和部分指标的相关性进行了分析。目前对于珠海地区软土工程特性的研究还相对较少, 且主要集中在通过统计分析的方法对物理力学指标等的分析, 缺少珠海各工程建设区域的抗剪强度参数变化规律和变形指标等重要参数的研究。

为对珠海洪湾地区淤泥的基本物理特性和力学特性等参数进行分析, 本研究主要是通过室内试验对该地区原状土样进行测定, 采用基本物性试验、常规固结试验、固结不排水三轴试验等对土体进行全面研究。将多种试验方法相结合, 深入了解淤泥所表现出的复杂特性, 对其物理力学特性变化规律进行了分析, 得到了原状淤泥试样的变形和强度特性, 为有效解决珠海洪湾地区实际工程建设提供创新的方法和解决方案。

## 1 试验土样与试验方法

本文所采用的原状淤泥试样取自珠海洪湾大道二期项目, 选取现场ZK-1、ZK-2和ZK-3共3个典型钻孔, 共取18个原状试样。原状试样的取样深度为6.1~15.7 m, 直径×高为10 cm×20 cm的圆柱形(图1)。为探讨原状试样的物理及力学性质分布规律, 对不同钻孔的原状试样, 进行了基本物性试验、渗透试验、一维固结试验和三轴剪切试验, 并对其基本物理指标、变形参数和强度参数等进行了分析。

### 1.1 固结试验方案

土体的变形主要与其压缩特性有关, 土体的变形对于工程建设的安全性不言而喻。为明确原状土样的变形特征, 对试样开展了室内一维无侧

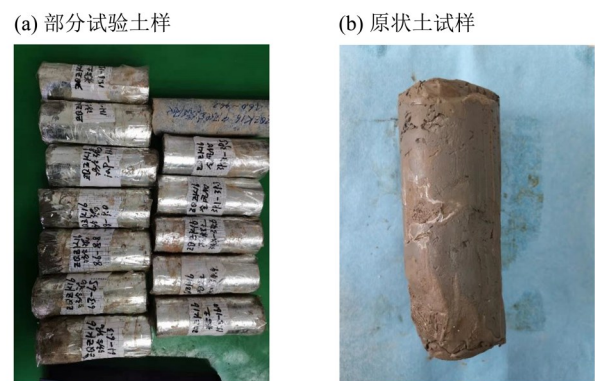


图1 现场淤泥试样

Fig. 1 On-site silt samples

限固结压缩试验,得到试样的压缩模量 $E_s$ 、压缩系数 $a_v$ 等。固结试验采用GZQ-1型全自动气压固结仪,该仪器由固结仪、气压控制台、多路通讯转换器和数据采集系统组成。仪器技术规格:载荷为0~9.6 kN;载荷精度 $\leq 100$  kPa;绝对误差 $\pm 1.0$  kPa;相对误差 $\pm 1.0\%$ 。

固结试验选用面积为 $30\text{ cm}^2$ 的环刀,通过切取原状土样得到原状固结试样(图2a)。将试样置于抽气缸中进行抽气饱和,对固结试样进行饱和处理(图2b)。饱和完成后开始固结试验,荷重序列选择为12.5、25、50、100、200、400、800、1 600、3 200 kPa。

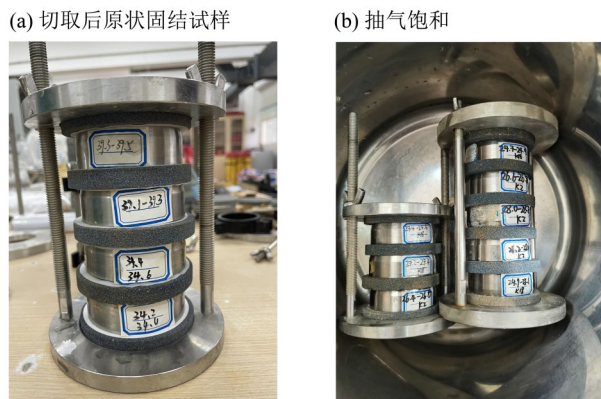


图2 固结试样处理过程

Fig. 2 Solidified specimen processing

### 1.2 三轴试验方案

考虑到现场土样的透水性及排水能力,对原状试样进行了一系列室内固结不排水三轴剪切试验。对三轴试验数据进行处理,得到莫尔圆并求解其对应的抗剪强度参数、应力应变关系曲线等,再由试验结果分析土样的工程力学特性。为充分反映现场土样的真实特性,试验方案选取原状试样进行加载(图3),通过使用切土器将不同钻孔中选取的原状试样切削至标准三轴试样尺寸。对三轴试样进行真空饱和后,选取三级围压分别为50、100、150 kPa,开展固结不排水三轴试验,试验采用SYL-2型全自动应变控制式三轴仪。试验加载时

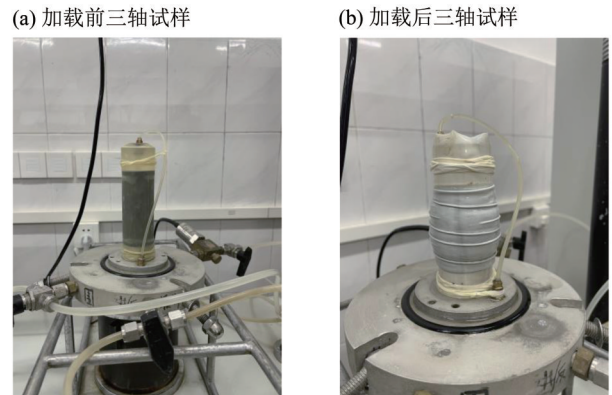


图3 三轴试样加载过程

Fig. 3 Triaxial specimen loading process

采用应变控制,剪切加载速率选择 $0.1\text{ mm/min}$ ,轴向位移加载至 $20\text{ mm}$ ,视为试样加载结束(图3b)。

## 2 珠海淤泥的基本物理特性

### 2.1 基本物性参数

土体的基本物性参数包括含水率、密度、颗粒比重、界限含水率等指标。对不同钻孔原状试样的基本物性指标进行测试,结果如表1所示。可以看出,试样的天然含水率 $\omega_0=54.70\%\sim 64.92\%$ ,天然含水率较高。淤泥天然密度 $\rho_0$ 较小,范围在 $1.02\sim 1.11\text{ g/cm}^3$ 之间,颗粒比重 $G_s=2.62\sim 2.69$ 。淤泥的塑限 $\omega_p=35.67\sim 46.67$ ,液限 $\omega_L=57.38\sim 70.28$ ,塑性指数 $I_p=18.70\sim 24.43$ ,说明淤泥土样的颗粒较细,黏性较大,可塑性较强。

### 2.2 渗透特性

淤泥土样具有强度低、变形大等特点外,渗透系数低也是该土样的一个重要特征。由于各钻孔的土质不尽相同,土体的渗透系数 $k$ 随着孔隙比 $e$ 等因素的变化会发生变化,所以明确各种土质的渗透系数具有十分重要的意义,故采用变水头渗透试验对各钻孔选取的代表性土样进行室内试验测试。通过使用 $120\text{ cm}^3$ 的环刀直接切取原状土样,将得到的原状环刀试样进行真空饱和,待试样完全饱和后进行变水头渗透试验,渗透试验结果如表2所示。

表1 不同钻孔淤泥样品的物理特性

Table 1 Summary of physical properties of silts in different boreholes

钻孔	试样深度/m	$\omega_0/\%$	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$G_s$	$\omega_p$	$\omega_L$	$I_p$
ZK-1	9.2~15.6	54.70	1.11	2.68	35.67	57.38	21.72
ZK-2	6.1~11.3	64.92	1.08	2.69	45.85	70.28	24.43
ZK-3	9.8~15.7	63.48	1.02	2.62	46.67	65.37	18.70

表2 渗透试验结果  
Table 2 Summary of penetration test results

钻孔	试样深度/m	$k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$e$
ZK-1	12.0~12.2	$5.86\times 10^{-7}$	1.70
ZK-2	6.1~6.3	$3.68\times 10^{-7}$	1.54
ZK-3	10.0~10.2	$4.27\times 10^{-7}$	1.67

由表2可以得到, 现场原状淤泥试样的渗透系数  $k=3.68\times 10^{-7}\sim 5.86\times 10^{-7}$  cm/s, 相应的孔隙比  $e=1.54\sim 1.70$ 。由试验结果能够得出, 原状土样的渗透系数较小, 表明该土样的透水性较差, 并且能够看出随着试样孔隙比的增大, 其渗透系数也存在逐渐增大的趋势。

### 3 一维压缩特性

固结试验完成后得到了各试样的孔隙比  $e$  与竖向应力  $p$  之间的变化关系, 通过进一步的计算得到土样的孔隙比与竖向应力在对数坐标系中的  $e\text{-lg}p$  关系。根据各钻孔的试验结果, 可以看出: 固结试验中土样的竖向应力大于 200 kPa 以后, 试验曲线变化逐渐变缓。在竖向应力达到 1 600 kPa 后,

试样的变形基本达到稳定。其主要原因是由于土体的压缩主要是由于孔隙水及气体的排出, 随着竖向应力的增大, 排出的速度越快。但当土体所受荷载大于 1 600 kPa 时, 试样的结构性被破坏, 此时土体的压缩性以土体内部结构重新排列和土体结合水的析出为主, 导致试样的压缩速率变缓。

由不同位置处土样的固结试验数据可以看出(图4), 现场原状土样在沉积过程中, 早期沉积的土体, 由于排水条件较差, 固结缓慢, 后期土体沉积之后, 土体受到排水条件的限制, 排水固结速度没有明显的增加, 所以表现出上部土体和下部土体的压缩特性相似的特点。原状试样的压缩系数  $a_v=1.269\sim 1.618$  MPa<sup>-1</sup>, 压缩模量  $E_s=1.449\sim 1.919$  MPa, 属于典型的高压缩性土体。同时随着土体深度的变化, 土体的压缩系数和压缩模量等参数变化较为显著, 主要表现为上部土体的压缩系数较大、压缩模量较小, 下部土体的压缩系数较小、压缩模量较大的特点(王婧, 2013)。下部淤泥试样长期受上覆土重的作用, 导致下部淤泥的密实程度增加, 使得下部淤泥的压缩性降低, 导致下部土体的压缩系数和压缩模量等参数表现出不同于上部土体的特点。

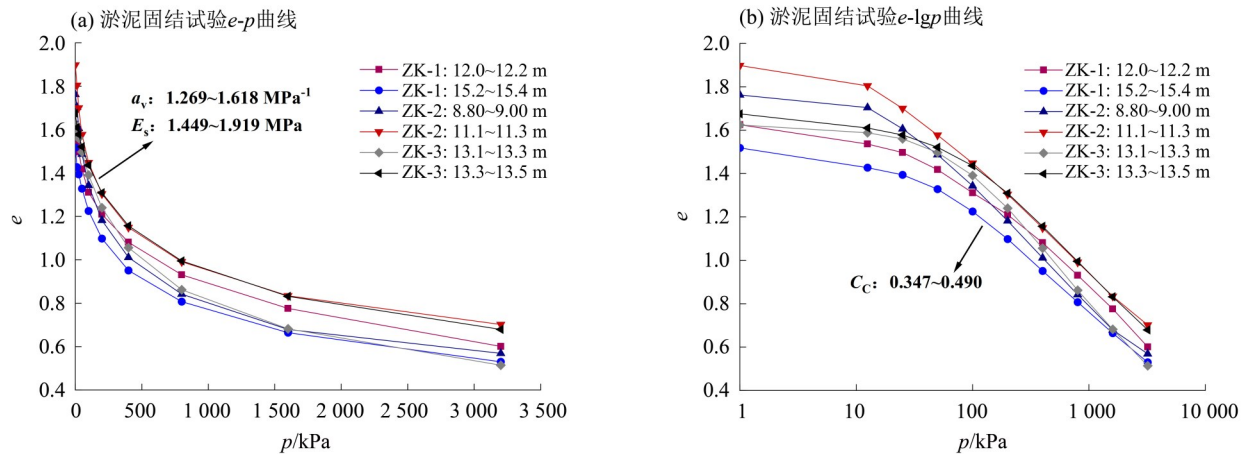


图4 不同位置处淤泥试样固结试验结果

Fig. 4 Consolidation test diagram of silt specimens at different locations

### 4 抗剪强度参数研究

对得到的三轴试验数据进行处理, 得到对应的偏应力  $\sigma_1\text{-}\sigma_3$  及轴向应变  $\varepsilon$ , 对部分代表性试样的偏应力-应变关系进行汇总(图5), 同时根据试样加载过程中的峰值强度及围压大小等关键参数求解并绘制其强度包络线, 得到抗剪强度参数等关键信息(图6)。

通过分析不同钻孔试样的偏应力-应变曲线,

可以看出现场原状试样在加载过程中主要呈现为应变硬化的特征, 随着加载过程中试样应变的增大, 偏应力保持增加的趋势。在加载初期, 试样轴向应变变化较缓, 随着偏应力逐渐增大, 轴向应变变化也逐渐加快。通过对比不同钻孔、不同深度处原状试样的抗剪强度参数, 可以发现试样的黏聚力  $c=10.10\sim 20.84$  kPa, 内摩擦角  $\varphi=7.28^\circ\sim 12.09^\circ$ 。对比同一钻孔中不同深度处试样的抗剪强

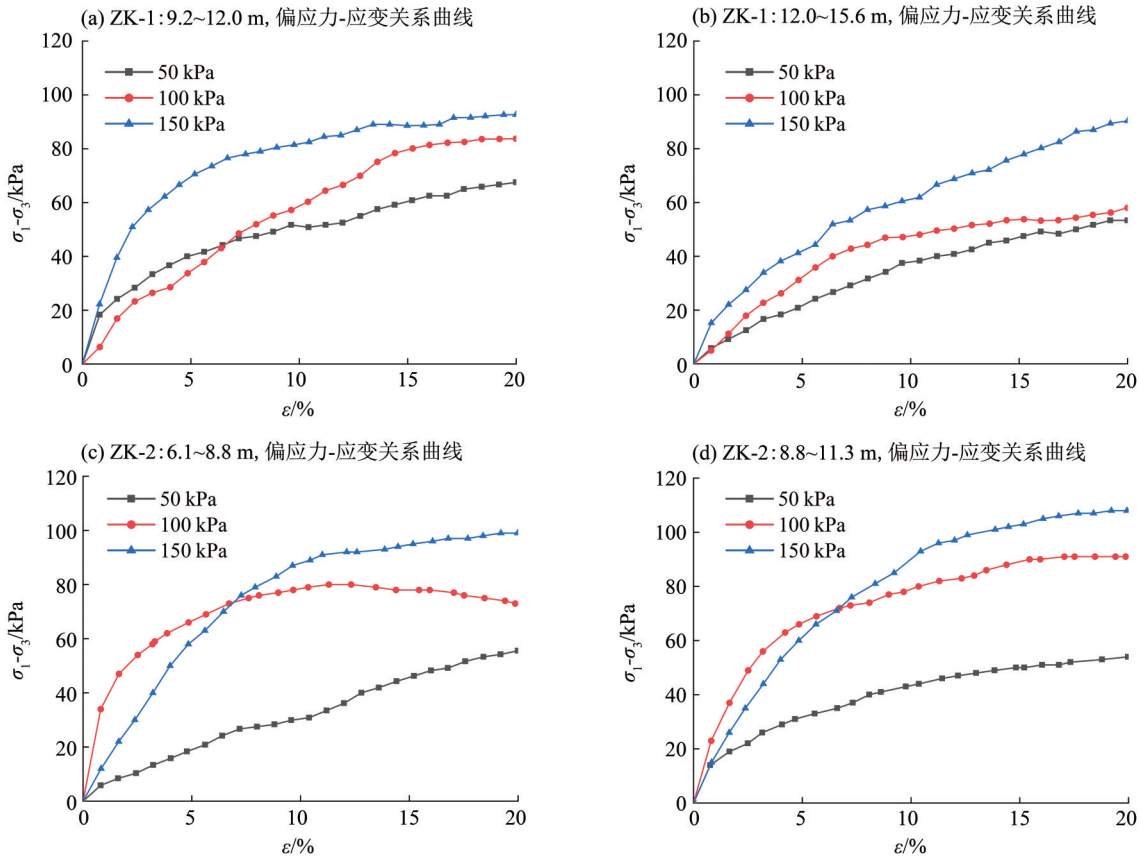


图 5 不同位置试样三轴试验结果

Fig. 5 Triaxial test results of specimens at different locations

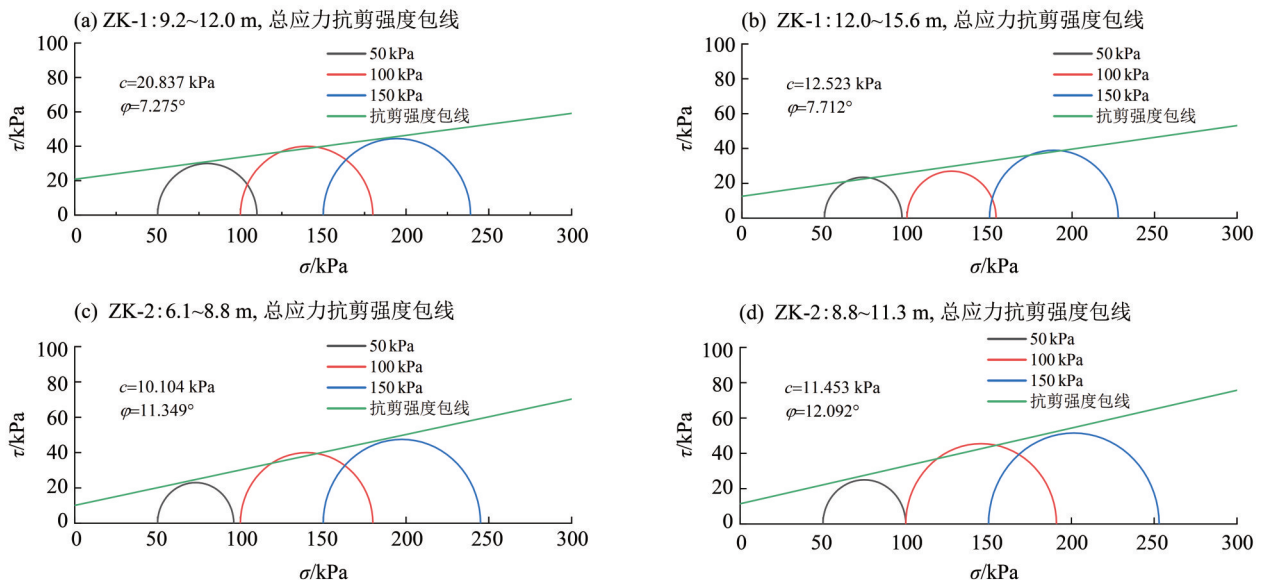


图 6 不同位置试样抗剪强度参数

Fig. 6 Parameters of shear strength of specimens at different locations

度参数, 可以得到随着原状试样所处深度的增加, 土体的内摩擦角有较小的增长趋势, 但能够发现试样的黏聚力随着深度的增加, 整体呈现出逐渐减小的趋势, 这一现象与已有研究结论相符(王

婧, 2013)。但是对于 ZK-2 孔试样而言, 黏聚力随着深度变化的这一规律并不明显, 对其原因进行分析, 综合考虑试验过程中的实际情况, 这一原因可能是由于原状试样均匀性差所导致的。对原

状试样切取三轴试样过程中,能够发现原状试样中存在大量的石砾、贝壳及大小分布不均的孔隙等,且分布不均匀,但这一因素对原状试样来说不可避免。原状试样的不均匀性会导致加载应力应变曲线的光滑性较差,产生不规则的波动,同时也会对土样的内摩擦角和黏聚力等参数变化规律产生一定的影响。为避免不均匀性对试验结果的影响,通过分析多个试样的规律,总结得到能够适合大部分试样的规律,由此来实现对于现场土样的工程性质的准确评估。

## 5 结论

珠海地区淤泥分布广泛,但其工程特性普遍较差,为获得原状淤泥试样的基本物性参数,了解其剪切、变形特性,开展了基本物性试验和一维固结试验及三轴剪切试验,得到以下结论:

1) 洪湾大道二期项目现场原状试样的天然含水率较高,塑性指数相对较大,天然状态接近饱

和,且原状试样表现出了一定的压密性,天然孔隙比 $e$ 随着取样深度的增加而减小。

2) 由变水头渗透试验的试验结果能够得出现场原状试样的透水性很差,渗透系数 $k$ 较小,其渗透系数范围为 $3.68 \times 10^{-7} \sim 5.86 \times 10^{-7}$  cm/s。

3) 随着取样土体深度的变化,土体的压缩系数和压缩模量变化明显,土体深度越深,其压缩系数越小,压缩模量越大。

4) 根据一维固结试验得出的压缩系数及压缩模量可得:压缩系数 $a_v$ 范围为 $1.269 \sim 1.618$  MPa $^{-1}$ 、压缩模量 $E_s$ 范围为 $1.449 \sim 1.919$  MPa,原状淤泥试样为高压缩性土。

5) 本文所研究现场原状淤泥试样在加载过程中主要呈现应变硬化特性,试样的抗剪强度参数随土层深度的变化而改变。随着取样深度的增加,原状试样的内摩擦角有较小的增长趋势,而黏聚力整体表现为逐渐降低的趋势。

## 参考文献:

陈晓平,黄国怡,梁志松,2003. 珠江三角洲软土特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,(1):137-141.

丁晓庆,2009. 广州地区软土的强度及应力应变特征的研究[J]. 中国科技信息,(8):17-18.

杜雅峰,夏欢欢,刘会平等,2013. 广州地区海积软土蠕变特性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,11(2):12-16.

林奕禧,艾康洪,彭立才,等,2009. 珠海软土宏观特性及工程热点问题[C]// 2009GHMT第7届两岸四地工程师论坛. 台北:6.

刘汉龙,扈胜霞,HASSAN ALI,2008. 真空-堆载预压作用下软土蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学,(1):6-12.

刘娉慧,贾景超,杜雅峰,2015. 低频循环荷载下海积软土蠕变特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报,11(5):1193-1198.

刘用海,2008. 宁波软土工程特性及其本构模型应用研究[D]. 杭州:浙江大学.

彭立才,温勇,杨光华,等,2016. 珠海横琴新区软土物理力学指标统计分析[J]. 广东水利水电,(4):29-32.

邱国阳,陈智寿,谈华顺,等,2019. 温州地区典型软土蠕变特性试验研究[J]. 公路,64(2):206-211.

邵艳,王仕传,李长勇,2013. 合肥滨湖新区软土物理力学特性相关性分析[J]. 工业建筑,43(5):86-89.

唐昌意,胡正,李栋,等,2021. 珠海平沙新城软土特性与处治

对策研究[J]. 建筑结构,51(S1):1888-1893.

王婧,2013. 珠海软土固结性质的宏微观试验及机理分析[D]. 广州:华南理工大学.

王新波,张启辉,1999. 上海软土的归一化性状研究[J]. 上海地质,(2):14-18.

夏云龙,2015. 杭州软土的基本力学特性[J]. 四川建筑科学研究,41(1):135-140.

肖旺,郭全元,钟仕兴,2022. 珠江三角洲软土固化后力学特性研究[J]. 广东土木与建筑,29(5):44-47.

谢敏,钟素娟,2018. 福州滨海软土的物理力学特性试验研究[J]. 科技创新与应用,(33):62-64.

袁聚云,杨熙章,赵锡宏,等,1996. 上海软土各向异性性状的试验研究[J]. 大坝观测与土工测试,(2):10-14.

张静娴,杨爱武,张彦,等,2010. 天津海积软土蠕变特性试验研究[J]. 天津城市建设学院学报,16(2):102-106.

张勇,孔令伟,孟庆山,等,2006. 武汉软土固结不排水应力-应变归一化特性分析[J]. 岩土力学,(9):1509-1513.

周秋娟,陈晓平,2006. 软土蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报,(5):626-630.

LUO Q Z, CHEN X P, 2014. Experimental research on creep characteristics of Nansha soft soil [J]. Sci World J, (5): 968738.

(责任编辑 秦社彩)