

DOI: 10.11779/CJGE2019S1007

# 珠海软土工程特性空间异性规律研究

宋许根<sup>1</sup>, 王志勇<sup>1</sup>, 柏威伟<sup>1</sup>, 王哲<sup>1</sup>, 谢书萌<sup>1</sup>, 夏开宗<sup>2</sup>

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司道路交通设计研究院, 湖北 武汉 430063; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 软土的物理力学参数是软基处理设计的基本依据。以珠海市西部中心城区首期开发项目(A片区)大量资料分析为基础, 通过实验测试数据统计来探讨珠海市西部中心城区软土的分布和参数的空间异性规律。研究结果如下: 通过对勘探数据处理, 得到珠海西部中心城区A片区软土厚度分布等值线图; 先期固结压力, 无侧限抗压强度随深度的增加而增加, 灵敏度和有机质含量不受深度变化影响; 含水率、液限、塑限和塑性指数随深度的变化规律为先增大后减小; 直剪强度指标随深度变化规律与含水率、液限、塑限等指标相反, 呈先减小后增大的规律; 原位试验结果与室内实验所得的结果有一致性又有区别, 在使用室内试验强度指标设计时应充分参考原位试验结果。

**关键词:** 珠海软土; 软土参数; 统计规律; 软土分布; 空间异性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0025-04

作者简介: 宋许根(1992—), 男, 江西吉安人, 硕士, 助理工程师, 主要从事边坡稳定性、软土工程特性和软基处理方面的研究与勘察设计工作。E-mail: songxugen@qq.com。

## Spatial heterogeneity of engineering properties of Zhuhai soft soils

SONG Xu-gen<sup>1</sup>, WANG Zhi-yong<sup>1</sup>, BAI Wei-wei<sup>1</sup>, WANG Zhe<sup>1</sup>, XIE Shu-meng<sup>1</sup>, XIA Kai-zong<sup>2</sup>

(1. Institute of Road Planning and Design, China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China; 2. Stake Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** The physical and mechanical parameters of soft soils are the fundamental basis for the design of soft roadbeds. Based on the analysis of amounts of test data in the central area of western Zhuhai, the distribution of soft soils and the laws of spatial anisotropy of parameters are discussed. The distribution contour map of the soft soils is obtained. The pre-consolidation pressure and the unconfined compressive strength increase with depth. The sensitivity and organic matter content are not affected by the change of depth. The water content, liquid limit, plastic limit and plasticity index changing with depth increase first and then decrease. The laws of direct shear strength indexes changing with depth are opposite to those with the water content, liquid limit and plastic limit, and they decrease first and then increase. The results of the in-situ tests are consistent with those obtained by the laboratory experiments, and there are also differences. When using the intensity indexes of laboratory experiments in design, the in-situ test results should be referred to.

**Key words:** Zhuhai soft soil; soft soil parameter; statistical analysis; soft soil distribution; spatial anisotropy

## 0 引言

软土在中国沿海等地区广泛分布, 具有含水率高、压缩率高、孔隙比高、灵敏度高、渗透系数低、承载力低和欠固结等特性<sup>[1-2]</sup>, 成为工程建设领域关注的热点问题之一, 针对上述问题, 国内外学者开展了大量研究, 并取得了许多有益的成果。龚晓南<sup>[3]</sup>针对软土地区工程事故典型案例, 分析了导致事故发生的原因, 提出了相应预防措施; 孔令伟等<sup>[4]</sup>通过系统的室内实验, 从有机质含量、矿物成分、物理化学特性和孔隙结构等方面, 分析了湛江与海口软土的工程特性及其微观机制; 雷华阳等<sup>[5]</sup>利用微观定量化技术, 从微观

角度对软土的加速蠕变机制进行了解释。然而由于受沉积年代、赋存环境(围压)和排水条件等因素的影响<sup>[6]</sup>, 软土物理力学参数表现出较强的地域性和空间异性, 目前对于软土参数的空间异性的研究成果较少, 且大多采用岩土工程常用的随机场理论<sup>[7]</sup>。即参数统计特性值(均值和方差等)不随空间位置的推移而变化。这种假设对于岩体比较适用, 而对于软土, 在实际工

基金项目: 中铁第四勘察设计院重点科研攻关项目(2015K84)

收稿日期: 2019-04-28

通讯作者(E-mail: 358799558@qq.com)

程中, 这种假设往往很难成立, 例如, Lumb<sup>[8]</sup> 和 Vanmarcke 等<sup>[9]</sup>曾通过研究得出, 在岩土工程分析中不能忽略土体参数统计特性值均值和方差等随空间位置的变化。因此, 通过室内试验和原位测试数据来分析软土参数的空间异性规律, 就显得尤为重要。

## 1 工程概况

### 1.1 项目概况

珠海西部中心城区位于珠海市西部, 规划区总面积约为 247.03 km<sup>2</sup>, 是珠海市计划 5 a 在基础设施投资千亿元建设的城市副中心, 区内有大面积软土覆盖, 且软土埋深大。其中, 珠海市西部中心城区 A 片区是珠海市西部中心城区重大启动项目, 面积约 11.35 km<sup>2</sup>, 总投资约 50 亿元。

### 1.2 工程地质条件

珠海西部中心城区 A 片区第四系海陆交互相沉积层 ( $Q_4^{mc}$ ) 在场地内广泛分布, 由淤泥、淤泥质黏土、粉质黏土、中砂和粗砂共 5 个亚层组成。珠海西部中心城区软土面积达到约 200 km<sup>2</sup>, 目前钻孔已揭露的最大深度达到 56.1 m, 淤泥层最大厚度达到 55.1 m, 平均 30.37 m, 其层顶埋深 0~5.30 m, 层顶高程 -4.48~−0.26 m。典型地质剖面如图 1 所示。

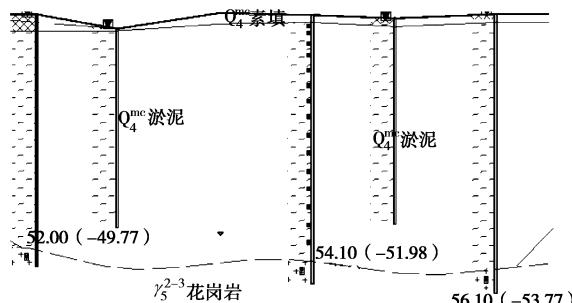


图 1 典型地质剖面图

Fig. 1 Typical geological section

## 2 软土特性与分布规律

为了全面掌握珠海西部中心城区 A 片区工程地质情况、软土工程特性及分布规律, 进行了大量钻探、室内试验和现场原位试验, 其中室内土工试验试样 1100 余个, 钻孔数 403 个, 钻探进尺约为 19279 m, 静力触探 162 孔, 总进尺约 5300 m, 十字板剪切孔数 29 个, 剪切试验 601 次, 标准贯入试验次数 3197 次, 得到了大量一手珍贵资料, 统计珠海西部中心城区 A 片区物理力学指标如表 1 所示, 并根据钻孔揭露的土层与岩性资料, 通过分析处理, 得到了珠海西部中心城区 A 片区软土分布等值线图, 如图 2 所示。

从表 1 可以看出, 珠海西部中心城区软土具有如下特点: 天然含水率高, 软土的平均含水率高达

68.05%, 最大含水率高达 98.8%, 液性指数位于 1.02~1.690, 软土处于流动状态; 孔隙比高、天然密度低, 孔隙比均值高达 1.79, 天然密度分布范围为 1.42~1.86 g/cm<sup>3</sup>, 均值为 1.59 g/cm<sup>3</sup>; 压缩性高, 压缩系数均值为 1.55, 属于高压缩性土; 抗剪强度低, 快剪黏聚力的均值为 4.93 kPa, 内摩擦角的均值为 3.26°。

从图 2 可以看出, 珠海西部中心城区 A 片软土厚度分部不均匀。从软土平面分布来看, 软土厚度在 28 m 以上的区域占珠海西部中心城区 A 片面积的 2/3 左右, 厚度大于 40 m 区域约占 1/3。



图 2 珠海西部中心城区 A 片软土分布等值线云图

Fig. 2 Contour map of part A in central area of western Zhuhai

表 1 物理力学性质统计表

Table 1 Physical and mechanical properties of Zhuhai soft soils

统计项	样本容量	平均值	标准差	变异系数
含水率 $w/\%$	890	68.05	9.08	0.133
天然密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	890	1.59	0.07	0.041
孔隙比 $e$	890	1.79	0.25	0.138
孔隙度 $n/\%$	890	63.89	3.21	0.050
液限 $w_L/\%$	890	63.02	7.77	0.123
塑限 $w_P/\%$	890	34.86	4.86	0.139
塑性指数 $I_p$	890	28.16	4.69	0.166
液性指数 $I_L$	890	1.18	0.14	0.121
快剪 $c/kPa$	149	4.93	1.04	0.210
快剪 $\varphi/(^\circ)$	149	3.26	0.61	0.186
压缩系数 $a_v/(MPa^{-1})$	890	1.55	0.52	0.336
压缩模量 $E_s/MPa$	890	1.71	0.49	0.287
渗透系数 $k_v/(cm \cdot s^{-1})$	7	$3.53 \times 10^{-6}$	$7.73 \times 10^{-6}$	2.187
有机质含量 $O_m/\%$	124	3.58	1.11	0.309

## 3 物理参数空间异性规律

根据钻探取得原状土样进行大量室内试验结果, 作出了代表钻孔的软土物理参数随深度变化曲线(图 3)。从图 3 可以看出, 珠海西部中心城区软土含水率、液限、塑限呈先增大后减小的趋势。含水率在 15.6 m 处达到最大值 90.30%, 在 13.6 m 处为 80.30%, 在 17.7 m 为 90.10%, 到 19.7 m 处为 83.00%, 在 13.6~19.7 m

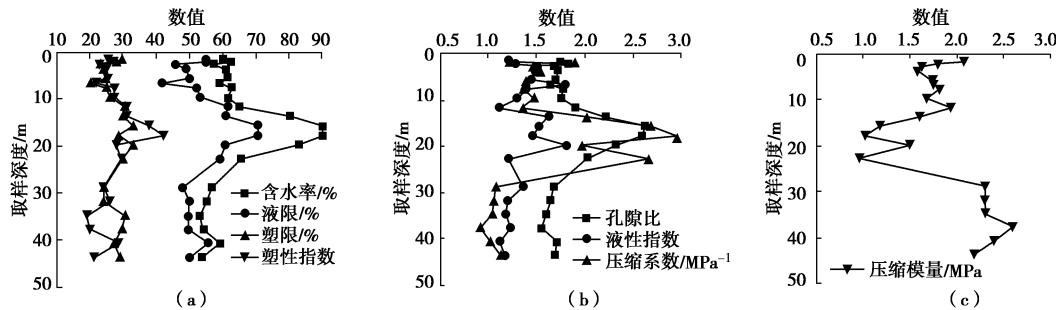


图 3 钻孔 XZK-3 物理参数随深度变化规律

Fig. 3 Variation of physical parameters of drilling hole XZK-3 with depth

含水率均值为 85.90%，是其他深度含水率均值的 1.45 倍；液限和塑限随深度变化的规律与含水率基本一致，液限在 15.6 m 处为 70.60%，在 17.7 m 处为 70.70%，在 13.6~19.7 m 液限均值为 65.70%，是其他深度液限均值的 1.27 倍，塑限在 15.6 m 处为 32.90%，在 19.7 m 处为 32.80%，在 11.6~19.7 m 塑限均值为 30.92%，是其他深度含水率均值的 1.18 倍。塑性指数、孔隙比、液性指数、压缩系数随深度也呈先增大，后减小的趋势，分别在深度 17.7, 15.6, 13.8, 17.7 m 位置处达到最大值。压缩模量与深度变化规律与含水率等指标相反，在 22.7 m 软土中间处达到最小值 0.96 MPa。

#### 4 力学参数空间异性规律

根据钻探取得原状土样进行大量室内试验结果，作出了代表钻孔力学参数随深度变化曲线（图 4, 5）。根据十字板剪切试验结果，作出了测孔（SZB-III 14-XF1<sup>#</sup>02 和 SZB-III 14-XF2<sup>#</sup>03）原状土和重塑土抗剪强度随深度变化曲线，如图 6 所示。

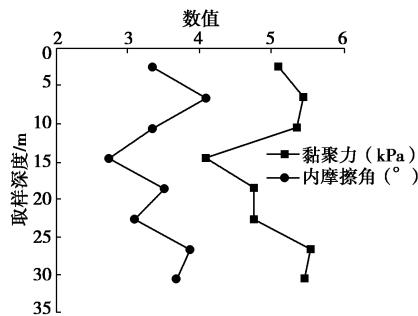


图 4 钻孔 ZK-III 14-XF2#03 力学参数随深度变化规律

Fig. 4 Variation of mechanical parameters of drilling hole ZK-III 14-XF2#03 with depth

从图 4 可以看出，钻孔 ZK-III 14-XF2#03 的黏聚力和内摩擦角随深度变化的规律为先减小后增大，黏聚力和内摩擦角分别在软土层中间位置深度 14.5 m 处达到最小值 4.1 kPa 和 2.75°。从图 5 可以看出无侧限抗压强度和先期固结压力随深度增加而增大，无侧限抗压强度在 0~5 m 处为 12.6 kPa，到 40~45 m 达

到 36.37 kPa；先期固结压力在 0~5 m 处均值为 38.37 kPa，到 40~45 m 均值达到 67.70 kPa。

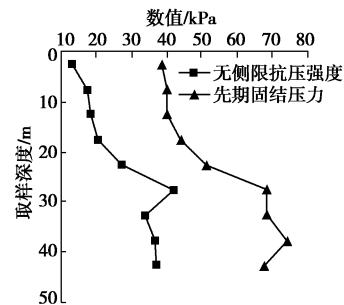


图 5 力学参数均值随深度变化规律

Fig. 5 Variation of average value of mechanical parameters of drilling hole ZK-III 14-XF2#03 with depth

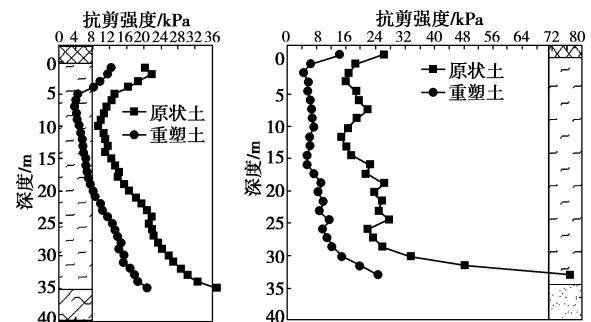


图 6 十字板剪切试验曲线图

Fig. 6 Variation of results of vane shear tests with depth

从现场十字板剪切试验结果来看（图 6），测孔 SZB-III 14-XF1<sup>#</sup>02 的原状土在 8~10 m 处的抗剪强度达到最小值 9.2 kPa，重塑土抗剪强度在 7~8 m 处达到最小值 3.8 kPa；测孔 SZB-III 14-XF2<sup>#</sup>03 的原状土在 9~11 m 处的抗剪强度达到最小值 14.6 kPa，重塑土抗剪强度在 11~13 m 处达到最小值 5.3 kPa。

原位静力触探和十字板剪切试验结果与室内实验所得的结果有一致性又有区别，一致性为力学指标随深度先增大后减小，区别在于最小值位置不完全相同，在使用室内试验强度指标设计时应充分参考原位试验结果。

## 5 结 论

通过对珠海西部中心城区 A 片区软土大量资料分析, 较为全面系统的分析了珠海西部中心城区软土的物理力学参数空间异性规律, 研究成果对于指导珠海西部中心城区软基处理及工程建设具有重要意义, 所得结论如下:

(1) 通过对地勘资料处理分析, 得到珠海西部中心城区 A 片区软土厚度分布等值线图, 从图中可以直观的看出软土的分布范围和厚度, 可为珠海西部中心城区 A 片区一级土地开发提供指导, 对今后二级土地开发也有重要参考价值。

(2) 先期固结压力, 无侧限抗压强度随深度的增加而增加。含水率、液限、塑限和塑性指数随深度的变化规律为先增大后减小, 在钻孔深度 15~20 m 处达到最大值, 因此, 在进行软基处理时, 处理深度应穿过含水率最大位置, 达到 20 m 以下。

(3) 直剪强度指标随深度变化规律与含水率、液限、塑限等指标相反, 为先减小后增大, 在进行软土边坡和基坑支护设计时, 要注意软土层中间这一深度的稳定性。

(4) 原位静力触探和十字板剪切试验结果与室内实验所得的结果有一致性又有区别, 一致性为力学指标随深度先增大后减小, 区别在于最小值位置不完全相同, 在使用室内试验强度指标设计时应充分参考原位试验结果。

## 参 考 文 献:

- [1] 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. (SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soils and design of soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(1): 100 ~ 111. (in Chinese))
- [2] XIA J, HUANG G L, YAN S B. 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): 48 ~ 59.

- [3] 龚晓南. 软土地区建筑地基工程事故原因分析及对策[C]// 中国土木工程学会年会. 西安, 2000. (GONG Xiao-nan. Analysis of cause and countermeasures for accidents of building foundation engineering in soft soil area[C]// China Civil Engineering Society Annual Meeting. Xi'an, 2000. (in Chinese))
- [4] 孔令伟, 吕海波, 汪 稳, 等. 某防波堤下卧层软土的工程特性状态分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 454 ~ 458. (KONG Ling-wei, LÜ Hai-bo, WANG Ren, et al. Analysis on engineering property of underlying soft soil stratum of a breakwater[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 454 ~ 458. (in Chinese))
- [5] 雷华阳, 贾亚芳, 李 肖. 滨海软土非线性蠕变特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 1): 2806 ~ 2816. (LEI Hua-yang, JIA Ya-fang, LI Xiao. Experimental study of nonlinear creep property of soft soil in littoral area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2806 ~ 2816. (in Chinese))
- [6] 宋许根, 王志勇, 柏威伟, 等. 珠海西部中心城区大面积深厚软土工程特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1434 ~ 1451. (SONG Xu-gen, WANG Zhi-yong, BAI Wei-wei, et al. Study on engineering characteristics of large-scale deep soft soil in central area of western Zhuhai[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(7): 1434 ~ 1451. (in Chinese))
- [7] 蒋水华, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑参数空间变异性的非饱和土坡可靠度分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2569 ~ 2578. (JIANG Shui-hua, LI Dian-qing, ZHOU Chuang-bing, et al. Reliability analysis of unsaturated slope considering spatial variability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2569 ~ 2578. (in Chinese))
- [8] LUMB P. The variability of natural soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1966, 3(2): 74 ~ 97.
- [9] VANMARCKE Erik. Random fields: analysis and synthesis[M]. Cambridge: MIT Press, 1983.

(责编: 胡海霞)