

珠海横琴软土工程性质与埋深相关性研究

焦春茂^{1,2}, 汪华安^{1,2}, 廖雁群³, 曾伟雄^{1,2}, 李迪³

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 广东科诺勘测工程有限公司, 广州 510663;
3. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 珠海, 519000)

摘要: [目的]为研究珠江口西岸广泛分布软土的工程性质, 指导区域性工程建设。[方法]以珠海市横琴新区某建设项目的岩土工程勘察数据为基础, 借助现代数理统计手段分析其物理力学性质参数, 研究该区软土工程特性及参数相关性。[结果]结果表明: 横琴新区软土具有高含水率、高孔隙比、流塑状态、高压缩性、低强度值、欠固结性等典型的软土特征; 其天然含水率随埋深增加而减少, 塑性指数随埋深增大而增大, 软土接触性状随深度增大变得更好; 由直接快剪试验得到的抗剪强度指标随埋深增大而增大, 而由固结快剪试验与三轴固结不排水抗剪强度(CU)试验得到的抗剪强度指标没有呈现出规律性; 抗剪强度呈现出较好的规律性, 随埋深增大而增大。[结论]该区软土深厚, 物理力学性质与工程特性随深度规律地变化, 其中埋深 18~27 m 之间的软土性状在水平方向上变化较大, 建议对该区软土勘察时, 应根据工程设计特点必要时细分土层。

关键词: 横琴新区软土; 工程特性; 物理力学参数; 相关性分析

中图分类号: TM611; TU447

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)S1-0199-05

Study on Correlation Between Soft Soil Engineering Characteristics and Burial Depth in Hengqin New Area of Zhuhai City

JIAO Chunmao^{1,2}, WANG Huaan^{1,2}, LIAO Yanqun³, ZENG Weixiong^{1,2}, LI Di³

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
2. Guangdong Kenuo Surveying engineering Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;
3. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: [Introduction] In order to study the engineering properties of soft soil widely distributed in the West Bank of the Pearl River Estuary and guide the regional engineering construction. [Method] The physical and mechanical parameters of a construction project in Hengqin New Area of Zhuhai City were analyzed by means of modern mathematical statistics; the engineering characteristics and parameter correlation of the soft soil in the area were studied based on the geotechnical investigation data. [Result] The results show that the soft soil in Hengqin New Area has the typical characteristics of high water content, high porosity ratio, fluid-plastic state, high compressibility, low strength value and under-consolidation, its natural water content decreases with the increase of buried depth, plasticity index increases with the increase of buried depth, and the contact behavior of soft soil becomes better with the increase of depth; The shear strength index obtained by the fast shear test increases with the buried depth, but the shear strength index obtained by the consolidated fast shear test and the triaxial consolidated undrained shear strength (CU) test shows no regularity; The shear strength shows a good regularity, and increases with the buried depth. [Conclusion] Due to the soft soil in this area is deep, and its physical and mechanical properties and engineering properties change regularly with depth. The soft soil properties between 18m and 27m in depth change greatly in horizontal direction. It is suggested that the soil layers should be subdivided according to the engineering design characteristics when it is necessary.

Key words: form soft soil in Hengqin new area; engineering characteristics; physical and mechanical parameters; correlation analysis

收稿日期: 2018-10-10 修回日期: 2018-11-08

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目“高压电缆通道高精度空间测量、快速定位及位移安全性评估与防治技术研究”(GD-KJXM20172620)

不同地区之间的软土在微观结构、物理力学性质、固结特性等方面表现出有规律性的差异, 具有区域性的组成成份和工程特性特征, 这是由各自区域独特的地质演变历程、水体条件、沉积环境和应力

历史决定的。同一区域的软土具有极大的相似性,因此,对区域性软土的工程特性及参数相关性进行研究,在区域性工程建设中具有重要的现实意义。吴雪婷等对不同区域软土如连云港地区海积软土、温州地区浅滩软土、珠江三角洲海陆相软土、浙江滨海软土、广西南部海积软土的工程特性及参数相关性研究取得了规律性认识^[1-8]。本文拟以横琴新区某建设项目的岩土工程勘察数据为基础,借助现代数理统计手段分析其物理力学性质参数,研究该区软土工程特性及参数相关性。

珠海市横琴新区地处珠江口西岸,是珠海最大的海岛横琴岛与小横琴岛组成,土地总面积 106.46 km²,与澳门三岛一河之隔。横琴新区于 2010 年全面启动开发,工程建设中普遍应用软基处理技术、软土深基坑开挖与支护技术、软土复合地基及桩基技术。因此,掌握该地区软土的工程特性具有原始资料意义,可以积累经验,为横琴新区今后的工程建设提供借鉴。

1 横琴新区地质概况及软土成因

1.1 地质地貌概况

珠海市横琴新区地处广东省中部沿海、珠江三角洲南部前缘,华南及东南亚板块之间的次一级构造单元上,属于广州地洼边缘。横琴新区海岸在第四纪下沉,下沉幅度由北向南增加,所以第四系沉积物呈现出由北向南厚度增加的规律。横琴新区内部陆地以低山与平地为主,风化雨淋作用旺盛,具有典型的热带花岗岩丘陵地貌及红土丘陵地貌特征;滨海陆地地势低平,河网发育,鱼塘密布,海岸线曲折绵长,属于华南型的山地港湾海岸类型。

1.2 成因分析与分布规律

横琴新区软土按成因属于滨海相软土,为第四纪陆地下沉与近代海退所形成的浅海堆积,见于全新统灯笼沙组地层中。软土裸露于地表或伏于填土之下,呈多层结构,以淤泥、贝壳砂质淤泥为主,间夹薄层粘土或砂土、淤泥质砂,具有近山薄,近海厚的规律。软土分布面积广泛,层位稳定,厚度一般为 20~50 m,以淤泥为主^[9-10]。

2 软土物理力学参数统计

对横琴新区软土的物理力学性质指标试验数据进行统计,结果如表 1 与表 2 所示,这些指标是依

据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)完成的。综合表 1 中的统计成果,对研究区软土的工程特性有以下认识:

1)横琴新区软土大致分为淤泥与淤泥质土两类,其天然含水率均值分别为 65.6%、50.7%,孔隙比均值分别为 1.755、1.232,塑性指数均值分别为 23.3、21.1,液性指数均值分别为 1.58、1.14。指标表明该区软土具有高含水率、高孔隙比、流塑状态等特点。

2)淤泥与淤泥质土的黏聚力均值分别为 2.1、4.6,压缩系数均值分别为 1.593、1.252,压缩模量均值分别为 1.83、2.01,淤泥灵敏度均值为 2.0,超固结比均值分别为 0.371、0.355。指标表明该区软土具有高压缩性、低强度值、低灵敏度土、欠固结性等特点。

3)变异系数表明该区软土的物理性质指标除渗透系数外具有较好的稳定性,而力学性质与压缩固结性质指标稳定性较差。

3 参数相关性分析

3.1 天然含水率与孔隙比的相关性

天然含水率 w 是最容易获取的基本物理性质指标。对于饱和软土而言,天然含水率与孔隙比 e 共同反应了孔隙体积与材料中颗粒体积之比,是反应软土固结程度的重要指标。如图 1 所示,该区软土的天然含水率 w 与孔隙比 e 之间具有明确的相关性,相关系数 R 值为 0.971,相关性关系为:

$$e = 0.2882 + 2.23w \quad (1)$$

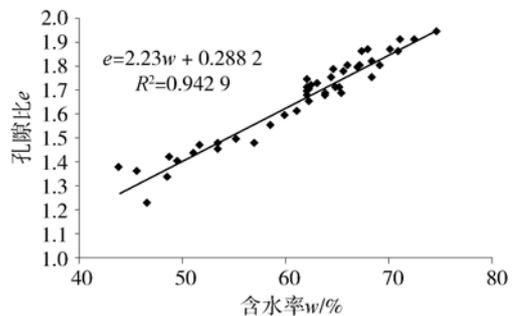


图 1 含水率与孔隙比的相关性

Fig. 1 Correlation between water content and porosity

3.2 天然含水率与深度的相关性

天然含水率随取样深度变化的规律如图 2 所示,整体呈现天然含水量 w 随软土埋深增加而减少的特征。但在 18~27 m 之间表现出较大的离散性,

表 1 软土物理性质参数统计

Tab. 1 Index of physical property of soft clay

| 土层名称 | 指标项目 | 天然状态性质指标 | | | | | | 稠度指标 | | | |
|------|------|------------|----------|--|--|--------------|---------|-------------|-------------|------------|------------|
| | | 含水率 $W/\%$ | 比重 G_s | 湿密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 干密度 $\rho_d/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 饱和度 $S_r/\%$ | 孔隙比 e | 液限 $W_L/\%$ | 塑限 $W_p/\%$ | 塑性指数 I_p | 液性指数 I_L |
| 淤泥 | 平均值 | 65.6 | 2.66 | 1.60 | 0.97 | 99 | 1.755 | 52.6 | 29.3 | 23.3 | 1.58 |
| | 最小值 | 58.6 | 2.64 | 1.55 | 0.90 | 95 | 1.551 | 41.3 | 21.8 | 17.2 | 1.19 |
| | 最大值 | 74.6 | 2.67 | 1.66 | 1.05 | 100 | 1.947 | 58.5 | 37.2 | 29.3 | 2.32 |
| | 变异系数 | 0.058 | 0.003 | 0.017 | 0.036 | 0.016 | 0.054 | 0.072 | 0.107 | 0.140 | 0.177 |
| | 统计个数 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| 淤泥质土 | 平均值 | 50.7 | 2.68 | 1.67 | 1.11 | 96 | 1.416 | 48.4 | 27.3 | 21.1 | 1.14 |
| | 最小值 | 43.9 | 2.66 | 1.63 | 1.07 | 86 | 1.232 | 41.7 | 22.9 | 14.7 | 1.01 |
| | 最大值 | 57.0 | 2.77 | 1.76 | 1.20 | 100 | 1.498 | 59.1 | 33.1 | 32.3 | 1.44 |
| | 变异系数 | 0.077 | 0.010 | 0.020 | 0.033 | 0.043 | 0.053 | 0.104 | 0.094 | 0.252 | 0.180 |
| | 统计个数 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 |

表 2 软土力学与压缩固结性质参数统计

Tab. 2 Index of mechanical and consolidation property of soft clay

| 土层名称 | 指标项目 | 直剪试验(快剪) | | 固结快剪试验 | | 三轴 CU 试验 | | 压缩性指标 | | | 超固结比 OCR |
|------|------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------|----------|
| | | 粘聚力 c/kPa | 摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 粘聚力 c/kPa | 摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 总应力 | | 压缩系数 $\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$ | 压缩模量 E_s/MPa | 压缩指数 C_c | |
| | | | | | | 粘聚力 c_{cu}/kPa | 摩擦角 $\varphi_{cu}/(\text{°})$ | | | | |
| 淤泥 | 平均值 | 2.1 | 2.8 | 10.6 | 9.6 | 13.7 | 10.4 | 1.593 | 1.83 | 0.514 | 0.371 |
| | 最小值 | 1.4 | 1.9 | 8.2 | 6.6 | 12.0 | 7.3 | 1.021 | 0.86 | 0.374 | 0.250 |
| | 最大值 | 3.5 | 3.8 | 13.6 | 14.1 | 15.0 | 14.3 | 3.403 | 2.69 | 0.894 | 0.530 |
| | 变异系数 | 0.274 | 0.233 | 0.215 | 0.296 | 0.080 | 0.279 | 0.293 | 0.209 | 0.246 | 0.239 |
| | 统计个数 | 9 | 9 | 6 | 6 | 7 | 7 | 32 | 32 | 15 | 14 |
| 淤泥质土 | 平均值 | 4.6 | 2.6 | 12.3 | 12.6 | 12.4 | 13.7 | 1.252 | 2.01 | 0.438 | 0.355 |
| | 最小值 | 2.9 | 1.5 | 8.9 | 8.5 | 11.0 | 13.0 | 0.898 | 1.54 | 0.386 | 0.260 |
| | 最大值 | 6.2 | 3.7 | 14.6 | 18.8 | 14.1 | 14.4 | 1.603 | 2.64 | 0.489 | 0.610 |
| | 变异系数 | - | - | - | - | - | - | 0.209 | 0.229 | 0.069 | 0.372 |
| | 统计个数 | 4 | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 12 | 12 | 8 | 6 |

范围值为 45% ~ 75%，分析其原因为该深度范围内的软土性状发生较大变化，水平方向展布为淤泥或淤泥质土交替。这个结论在综合分析其它试验指标后得到验证。

3.3 塑性指数与取样深度的相关性

塑性指数综合地反映了粘性土的组成成份，许多力学和固结压缩特性均与塑性指数有密切的关系，它是粘性土的最重要、最基本的物理指标之一，广泛应用于黏性土的分类和评价。塑性指数随取样深度变化的规律如图 3 所示，可知该区软土塑性指数整体呈现随埋深增大而增大的特征，表明该

区软土接触性状随深度增大变得更好。

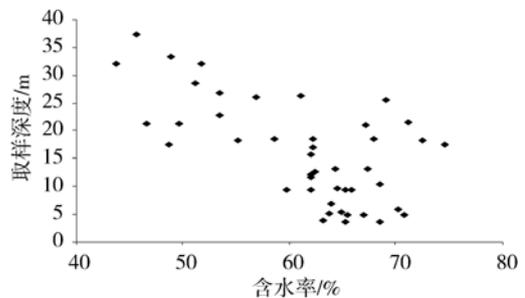


图 2 含水率与取样深度的相关性

Fig. 2 Correlation between water content and sampling depth

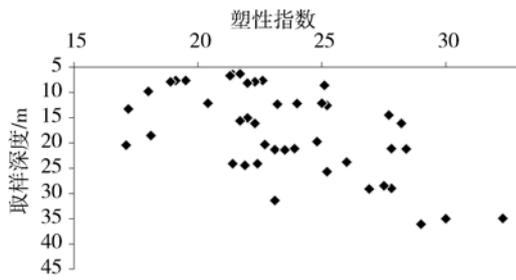


图3 塑形指数与取样深度的相关性

Fig. 3 Correlation between the shaping index and the sampling depth

3.4 剪切强度指标统计特性

依据上述分析, 该区软土的天然含水率、孔隙比与塑性指数均随埋深增大呈现出规律性的变化。理论上讲, 这些基本物理指标的规律性变化将决定该区软土的力学性质随深度规律性变化。直接快剪试验、固结快剪试验与三轴固结不排水抗剪强度试验(CU)三种条件下的黏聚力与内摩擦角试验值随取样深度的变化规律如图4~图5所示。

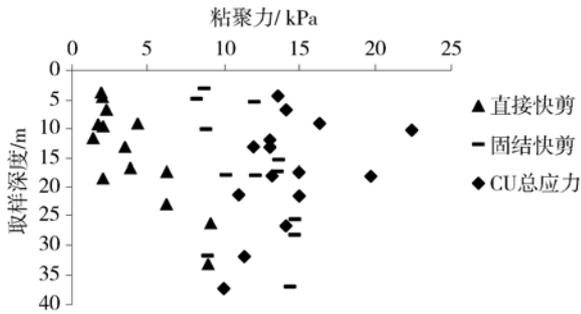


图4 黏聚力试验值分布

Fig. 4 Cohesion test value distribution

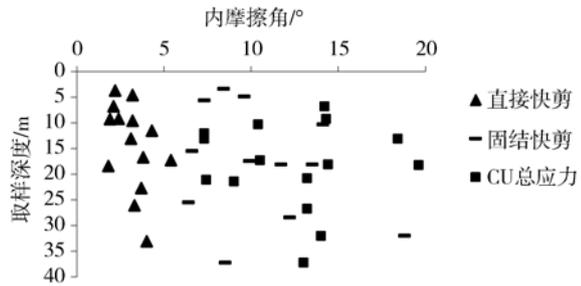


图5 内摩擦角试验值分布

Fig. 5 Internal friction angle test value distribution

由图4和图5可知, 该区软土由直接快剪试验得到的黏聚力值和内摩擦角值呈现出随埋深增大而增大的特征, 而由固结快剪试验与三轴固结不排水抗剪强度(CU)试验得到的抗剪强度指标没有呈现

出规律性。

分析其原因是直接快剪试验反应了软土在天然含水率和天然孔隙比状态下的天然力学性状, 试验值呈现出与理论推断的一致性。固结压缩试验与三轴固结不排水抗剪强度(CU)试验的抗剪强度指标没有呈现出规律性的主要原因是固结过程改变了软土的天然性状。另外, 试样的饱和度是否达到试验条件, 试验人员整理试验数据获取公切线经过技术处理, 这些因素也增加测值的变异性。

3.5 剪切强度与深度的相关性

抗剪强度与抗剪强度指标是两个不同的量, 抗剪强度指标则代表土体的抗剪强度随着土中应力大小变化的规律, 土体抗剪强度是指它在破坏面能够发挥出来的最大阻力^[10]。饱和黏性土层的抗剪强度由抗剪指标和深度共同决定, 抗剪强度随取样深度变化的规律如图6所示, 该区软土抗剪强度呈现出较好的规律性, 随埋深增大而增大。

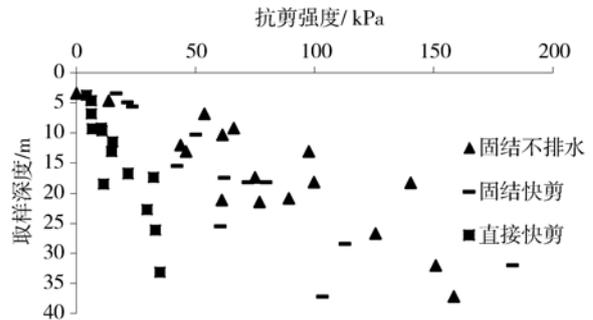


图6 抗剪强度与取样深度的相关性

Fig. 6 Correlation between shear strength and sampling depth

4 结论

1) 横琴新区软土大致分为淤泥与淤泥质土两类, 该区软土具有高含水率、高孔隙比、流塑状态、高压缩性、低强度值、低灵敏度土、欠固结性等特点。

2) 该区软土的天然含水率、孔隙比与塑性指数均随埋深增大呈现出规律性地变化, 整体呈现天然含水率随埋深增加而减少, 塑性指数随埋深增大而增大的特征, 该区软土接触性状随深度增大变得更好。

3) 该区软土由直接快剪试验得到的黏聚力值和内摩擦角值呈现出随埋深增大而增大的特征, 而由固结快剪试验与三轴固结不排水抗剪强度(CU)试

验得到的抗剪强度指标没有呈现出规律性。另外, 抗剪强度呈现出较好的规律性, 随埋深增大而增大。

4) 该区软土深厚, 物理力学性质与工程特性随深度规律地变化, 其中埋深 18~27 m 之间的软土性状在水平方向上变化较大。本文依据岩土工程勘察规范中土体定名标准划分为淤泥和淤泥质土两层, 仍可以依据土体工程特性细分。建议对该区软土勘察时, 宜根据工程设计特点必要时细分土层, 以保证工程设计安全适用、技术先进和经济合理。

参考文献:

- [1] 陈继彬, 赵其华, 彭社琴, 等. 西南山区沟谷型软土工程特性及沉降规律 [J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 945-950.
CHEN J B, ZHAO Q H, PENG S Q, et al. Engineering characteristics and settlement rules of gully soft clay in mountainous areas of Southwest China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Supp. 2): 945-950.
- [2] 张润明, 郑文棠. 相关型岩土参数分析和选用 [J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1995-1999.
ZHANG R M, ZHENG W T. Analysis and selection of correlational geotechnical parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1995-1999.
- [3] 徐晓斌, 肖广平, 王清, 等. 真空联合堆载预压软土路基失稳分析 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(增刊 1): 107-110.
XU X B, XIAO G P, WANG Q, et al. Instability analysis of soft foundation with vacuum surcharge preloading [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(Supp. 1): 107-110.
- [4] 姚宇, 黄德权. 气压劈裂真空法加固软土地基设计方法及工程应用 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(2): 141-146.
YAO Y, HUANG D Q. Design method and its engineering application on a combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing for soft ground improvement [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(2): 141-146.
- [5] 章定文, 刘松玉, 于新豹. 连云港海相软土工程特性及处治方法探讨 [J]. 工程地质学报, 2003, 11(3): 250-257.
ZHANG D W, LIU S Y, YU X B. Discussion on the engineering characteristics of marine soft soil and method for its treatment in Lianyungang [J]. Journal of Engineering Geology, 2003, 11(3): 250-257.
- [6] 陈晓平, 黄国怡, 梁志松. 珠江三角洲软土特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 137-141.
CHEN X P, HUANG G Y, LIANG Z S. Study on soft soil properties of the pearl river delta [J]. Chinese Journal of Rock
- Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 137-141.
- [7] 师旭超. 海相淤泥的固结特性及变形机理研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2003.
SHI X C. Study on consolidation properties and deformation mechanism of marine oze [D]. Beijing: CAS, 2003.
- [8] 张继周, 缪林昌, 陈俊波. 苏中腹地湖相软土土性参数变异性统计描述 [J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 471-477.
ZHANG J Z, MIAO L C, CHEN J B. Statistical characterization of variability of lacustrine soft soil in central region of Jiangsu province [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 471-477.
- [9] 珠海市建设工程质量监督检测站. 珠海市软土分布区工程建设指引 [R]. 广州: 华南理工大学, 2010: 13-20.
- [10] 龚晓南. 软黏土地基土体抗剪强度若干问题 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1596-1600.
GONG X N. Some problems concerning shear strength of soil in soft clay ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1596-1600.

作者简介:



JIAO C M

焦春茂(通信作者)

1980-, 男, 山东济宁人, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 博士, 主要从事岩土工程勘察, 基坑、边坡及地基处理方面的岩土工程设计工作 (e-mail) jiaochunmao@gedi.com.cn。

汪华安

1977-, 男, 安徽当涂人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事电力勘察设计工作 (e-mail) wanghuan@gedi.com.cn。

廖雁群

1984-, 男, 江西九江人, 高级工程师, 硕士, 从事高压电缆工程研究、建设与管理相关工作 (e-mail) lyqcsq@163.com。

曾伟雄

1970-, 男, 湖南祁东人, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事电力岩土工程勘察、软基处理、边坡评价与处理等方面的实践与研究 (e-mail) zengweixiong@gedi.com.cn。

李迪

1989-, 男, 广东珠海人, 高级工程师, 硕士, 主要从事电缆运行、维护和技术研究工作 (e-mail) 195244299@qq.com。

(责任编辑 郑文棠)